

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

REŠERŠE METOD ZJIŠŤOVÁNÍ GEOMETRICKÝCH CHYB OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

**LITERATURE REVIEW ON METHODS FOR INCREASES GEOMETRICS ERROR IN MASCHINE
TOOLS**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID ČEP

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. MICHAL HOLUB

SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Čep

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Rešerše metod zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů

v anglickém jazyce:

Literature Review on methods for increases geometrics error in maschine tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše a popis metod ke zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů.

Cíle bakalářské práce:

- Popsat geometrické chyby vyskytující se u obráběcích strojů
- Popis metod modelování geometrických chyb
- Provést rešerši metod a zařízení
- Provést popis metod a zařízení

Seznam odborné literatury:

- Marej,J.: Konstrukce CNC obráběcích strojů
- Borský: Základy konstrukce obráběcích strojů
- Weck,M.: Werkzeugmaschinenkonstruktion, Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität
- www.infozdroje.cz

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Holub

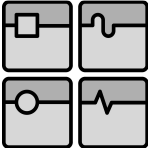
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je *Rešerše metod zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů*. V první kapitole jsou popsány nejpoužívanější geometrické zkoušky. Další část obsahuje zařízení používané pro tyto zkoušky. Závěrečná kapitola je věnována matematickému modelování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obráběcí stroj, geometrické zkoušky, měřicí přístroj, matematický model, geometrické chyby

ABSTRACT

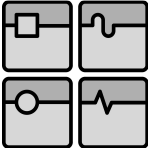
The subject of this thesis is *Literature review on methods for increases geometric errors in machine tools*. The first part lists the most used geometric tests. Measuring instruments used for these tests are described in the second part. The next part is devoted to the mathematic models.

KEYWORDS

Tool machine, geometric tests, measuring instrument, mathematic model, geometric errors

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČEP, D. *Rešerše metod zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 58s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Holub.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Rešerše metod zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Holuba a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. května 2009

.....

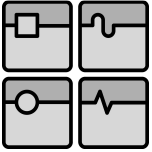
podpis autora

		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
		BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Michalu Holubovi za cenné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

OBSAH	
ÚVOD	12
1. GEOMETRICKÉ ZKOUŠKY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	13
1.1 Měření přímosti	14
1.1.1 Přímost čáry v rovinně nebo prostoru	14
1.1.2 Přímost součástí	20
1.1.3 Přímost pohybu	23
1.2 Měření rovnoběžnosti, shodnosti vzdáleností a sousosti	23
1.2.1 Rovnoběžnost čar a rovin	23
1.2.2 Rovnoběžnost pohybu	27
1.2.3 Shodnost vzdáleností	28
1.2.3 Sousost, shodnost os	29
1.3 Měření kolmosti	29
1.3.1 Kolmost přímek a rovin	29
1.3.2 Kolmost pohybu	32
1.4 Obvodové házení	33
1.5 Čelní házení	34
2. PŘEHLED PŘÍSTROJŮ VYBRANÝCH VÝROBCŮ	36
2.1 Vodováhy	36
2.2 Autokolimátor	37
2.3 Gepard	38
2.4 Úchylkoměr	38
2.5 Laserový paprsek	39
2.6 Laser tracker	40
2.7 Laserová interferometrie	41
2.8 Ballbar	43
3. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ	45
3.1 Úvod	45
3.2 Analytický výpočet	45
3.3 Chyby u obráběcího stroje	49
3.4 Virtuální prototypy	50
4. ZÁVĚR	52
5. POUŽITÉ ZDROJE	53
6. SEZNAM OBRÁZKŮ	56

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 12
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ÚVOD

Obráběcí stroj představuje z hlediska techniky velice složité zařízení, na které jsou kladeny vysoké požadavky. Proto musí být pro zachování vysokých nároků zařazeny úkony ve formě zkoušek pro ověření, zda obrobená část bude splňovat předepsané geometrické a rozměrové tolerance.

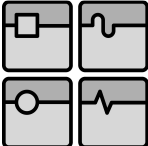
Význam technických měření s rostoucími požadavky na přesnost výroby se stále zvyšují. Často jsou zkoušky prováděny až tehdy, když výroba selže a vyskytnou se závady většinou vážného charakteru. Odstraňování bývá zpravidla mnohem dražší než kontrola, která by byla ekonomičtější a nezabrala by jistě tolik času, při kterém je stroj v odstávce. Geometrická přesnost obráběcího stroje je dána jako souhrn definicí, hodnot, způsobů měření a použité měřicí techniky, které stanovují mezinárodní, národní a další normy.

Zkoušky geometrické přesnosti jsou jednou z částí normy *ISO 230 ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ*. Tato norma je rozdělena do sedmi částí.

- Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění (ISO 230-1)
- Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených obráběcích strojů (ISO 230-2)
- Vyhodnocení tepelných vlivů (ISO 230-3)
- Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů (ISO 230-4)
- Stanovení emise hluku (ISO 230-5)
- Určení přesnosti polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení) (ISO 230-6)
- Osa rotace – Určení metod a zkoušení (ISO 230-7)

V této práci se zaměřím pouze na první část této normy. Geometrické zkoušky se skládají z ověření rozměru, tvarů a poloh součástí a jejich vzájemného přestavení. Zahrnují všechny operace, postihující součást stroje (rovinnost ploch, sousost, protínání os, rovnoběžnost a kolmost přímek a rovinných ploch). Týká se pouze rozměrů, tvarů, poloh a vzájemných pohybů, které mohou ovlivnit přesnost práce stroje. [1] Tato část normy se zabývá pouze zkouškami přesnosti, tudíž se nezabývá zkouškami funkčními (vibrace) ani zkouškami pro zjištění charakteristických parametrů (otáčky, posuvy).

Cílem této části normy ISO 230 je normalizovat metody zkoušení přesnosti obráběcích strojů, které pracují buď bez zatížení, nebo za dokončovacích podmínek obrábění, pomocí

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

geometrických zkoušek nebo zkoušek obrábění. Metody lze použít i na jiných typech pracovních strojů, kterých se zkoušky geometrické a pracovní přesnosti týkají.

Od osmdesátých let 20. století došlo k prudkému rozvoji měřicí techniky a měřicích zařízení. Podstatné zvýšení provozní charakteristiky, účinnosti a přesnosti přinesla číslicová technika a optoelektronické prvky. Tyto vývojové trendy přispěly k mnohonásobnému zvýšení množství zpracovávaných informací, produktivity měřicích operací. Měřicí technika se za toto období vyvinula od konvenčních měřidel až po digitální měřicí techniku a komplexní měřicí systémy.

1. GEOMETRICKÉ ZKOUŠKY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Geometrická přesnost se měří výhradně na úplně smontovaném obráběcím stroji. Měření musí být vždy prováděno tak aby nebylo potřeba ze stroje, který tvoří funkční celek odmontovat žádnou součást. Odmontovat některou z částí stroje je dovoleno pouze za předpokladu měření nezjistitelných úchylek (např. rovinnost vodících ploch na loži brusky vyžaduje odmontování stolu). Geometrická přesnost se určuje za tepelně ustáleného stavu, který je dosažen, když teplota libovolné části stroje v intervalu 15 minut je v rozsahu:

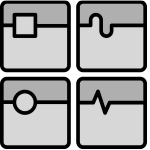
- ❖ 5% stroje normální přesnosti
- ❖ 3% stroje zvýšené přesnosti
- ❖ 1% stroje vysoké přesnosti

Zkoušky geometrické přesnosti začínají vždy dobrým uložením stroje tak, aby jeho výchozí (referenční) plocha byla ve vodorovné poloze. Tomuto úkonu se označuje jako uvedení stroje „do vodováhy“. Cílem je získat staticky stabilní polohu, zejména při měření týkající se přímosti. Do tohoto stavu se stroj dostává pomocí stavěcích klínů a šroubů umístěných na základu stroje.

Zkoušky se smí provádět pouze na obrobkách normalizovaných nebo na obrobkách dodávaných výrobcem. Na stroji nesmí být zkoušena operace, pro které není stroj určen. Kontrola se provádí měřidly určenými pro jednotlivé zkoušky.

K nejdůležitějším zkouškám obráběcích strojů patří zejména:

- Přímost

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 14
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- Rovnoběžnost
- Kolmost
- Obvodové házení
- Čelní házení

Další měření prováděné na obráběcích strojích jsou např.: Měření statické a dynamické tuhosti, Měření teplotní stability, Měření hlučnosti, spolehlivosti atd.

1.1 Měření přímosti

Měření přímosti lze rozdělit

- Přímost čáry v rovinně nebo prostoru
- Přímost součástí
- Přímost pohybu

1.1.1 Přímost čáry v rovinně nebo prostoru

- **Přímost čáry v rovině**

Čára ležící v rovinně je považována za přímou v určené délce, pokud všechny její body leží mezi dvěma přímkami, rovnoběžnými s hlavním směrem čáry, jejichž vzdálenost je rovna toleranci. [1]

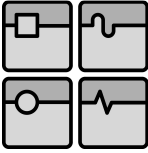
Hlavní směr čáry musí být volen tak aby, byla minimalizována úchylka přímosti, to lze udělat dvě běžnými metodami

- Dvěma body zvolenými blízko konců měřené čáry
- Výpočtem ze zaznamenaných bodů

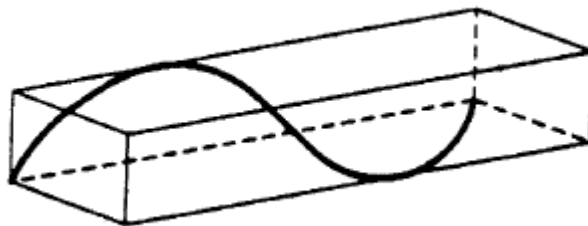


Obr. 1 Přímost čáry v rovinně [1]

- **Přímost čáry v prostoru**

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Čára ležící v prostoru je považována za přímou v určené délce, pokud každý z jejích průmětů do dvou určených, vzájemně kolmých rovin, rovnoběžných s hlavním směrem čáry, je přímý. [1]



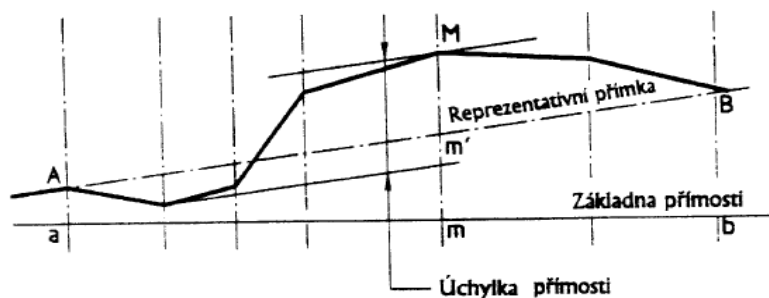
Obr. 2 Přímost čáry v prostoru [1]

Metody jsou založeny na dvou principech

- Měření délek
- Měření úhlů

Měření délek

Při měření délek měřidlo odečítá úchylky měřené čáry od základny přímosti. Odečítání se provádí v různých bodech po celé délce měřené čáry. Doporučuje se umístit základnu přímosti tak, aby odečty na obou koncích byly přibližně stejné. Z obr. 3 je vidět, že úchylka přímosti je dána vzdáleností mezi dvěma přímkami umístěnými v nejvyšším a nejnižším bodě úchylky.



Obr. 3 Měření délek [1]

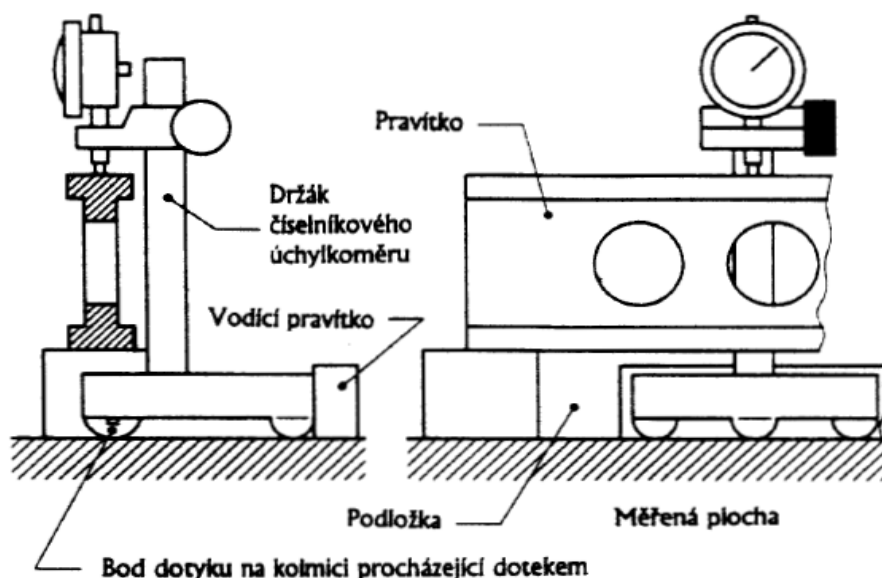
Do metod využívajících principu měření délek patří

Metoda měření pravítkem

- *Měření ve svislé rovině*

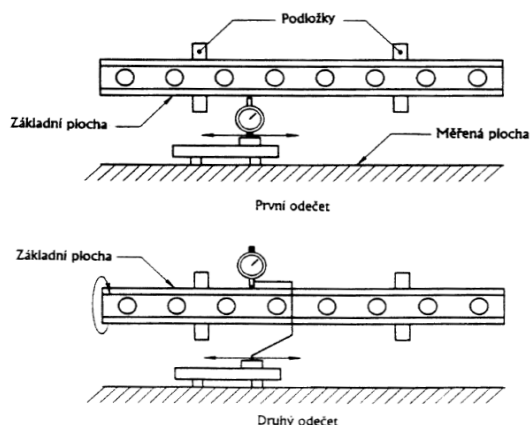
Pravítko je ustaveno na dvou podložkách, a je zde zapotřebí dbát na to, aby vzdálenost mezi podložkami odpovídala minimálnímu průhybu pravítka vlastní vahou.

Měření musí být provedeno tak, že se podél pravítka posouvá držák číselníkového úchylkoměru s třemi opěrnými body. Jeden z těchto opěrných bodů spočívá na čáře plochy, která má být měřena a dotek číselníkového úchylkoměru je na kolmici k této ploše, procházející uvedeným opěrným bodem a dotýká se pravítka. [1]



Obr. 4 Měření ve svislé rovině [1]

- *Měření ve vodorovné rovině*

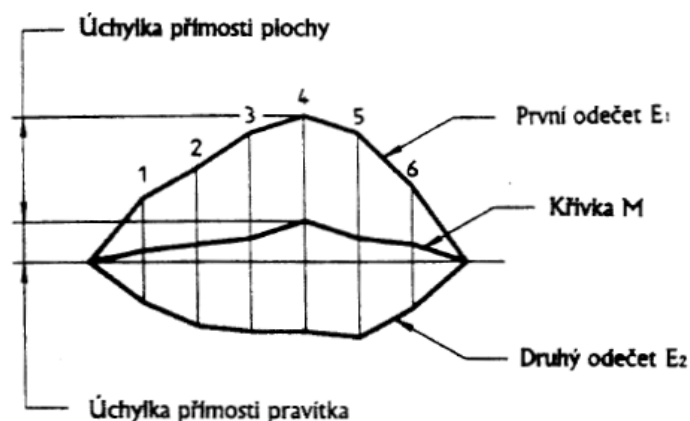


Číselníkový úchylkoměr se dotýká základní plochy pravítka a pohybuje se v kontaktu s měřenou plochou. Pravítko je ustaveno tak, aby na obou koncích čáry byly stejné odečty. [1]

Obr. 5 Měření ve vodorovné rovině [1]

Výhodou při měření ve vodorovné rovině je, že umožňuje měření úchylek přímosti jak měřené plochy, tak základní plochy pravítka. K tomu se využívá tzv. metoda převracení. To se uskutečňuje tak, že po prvním měření se pravítko otočí o 180° okolo podélné osy a úchylkoměrem, který je taktéž pootočen a umístěn na měřené ploše. Úchylkoměr se pohybuje podél základní plochy, která je na opačné straně.

Na obr. 6 jsou vidět křivky úchylek E_1 , E_2 a M . Křivka E_1 vznikne součtem úchylek pravítka a úchylek plochy. Křivka E_2 vznikne rozdílem těchto dvou křivek. Křivka M je průměrná hodnota z obou křivek a je úchylkou základní plochy pravítka. Pak úchylka E_{1M} nebo E_{2M} , která je stejná je úchylkou přímosti měřené plochy.



Obr. 6 Křivky úchylek [1]

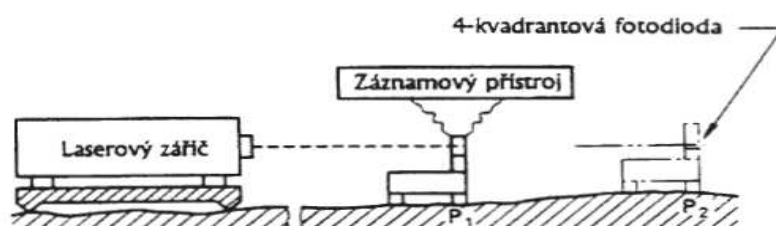
Mezi další metody používající se pro měření přímosti jsou např.:

- **Metoda měření strunou a mikroskopem**
- **Metoda měření zaměřovacím dalekohledem**

K moderním měřicím metodám jistě patří:

Metoda měření zaměřovacím laserem

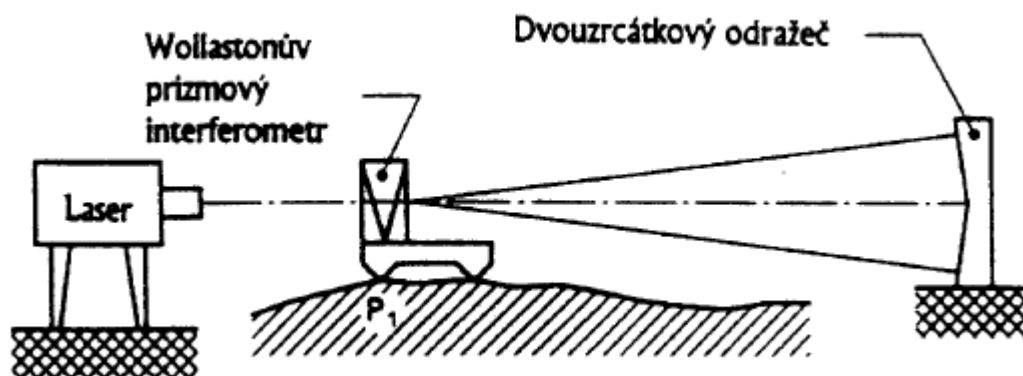
Jako základna měření je použit laserový paprsek. Paprsek je směřován na čtyř kvadrantový fotodiodový detektor, který se pohybuje ve směru osy laserového paprsku. Jsou snímány a k záznamovému přístroji vedeny vodorovné a svislé úchyly středu detektoru vůči paprsku. Mají být vzaty v úvahu pokyny výrobce měřicího zařízení. [1]



Obr. 7 Zaměřovací laser [1]

Laser-interferometrická metoda

Laser-interferometr, spolu se speciální optickou výbavou, se používá pro zjištění změn polohy ohniska vůči ose symetrie dvouzrcátkového odražeče. [1]



Obr. 8 Laser interferometr [1]

Měření úhlu

U těchto metod se posouvající prvek pohybuje po kontrolované čáře ve dvou bodech P a Q, které jsou ve vzdálenosti d . Prvek se pohybuje tak, že v sousedních polohách P_0 Q_0 a P_1 Q_1 je P_1 shodný s Q_0 . Přístrojem, umístěným v rovině kolmé na plochu obsahující měřenou čáru, se měří úhly α_0 a α_1 vzhledem k základně měření.

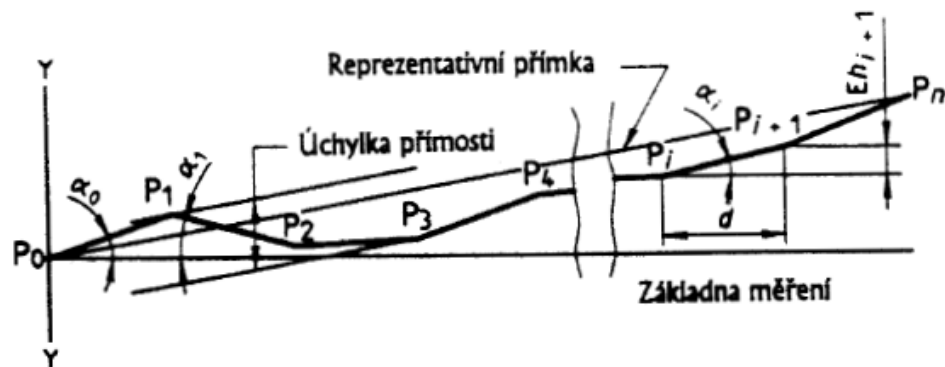


Obr. 9

Měření úhlů [1]

Grafické zpracování se provádí vynešením následujících parametrů

- Velikost kroku d jako souřadnice odpovídající měřené čáře
- Relativní rozdíly sklonu od základny jako pořadnice



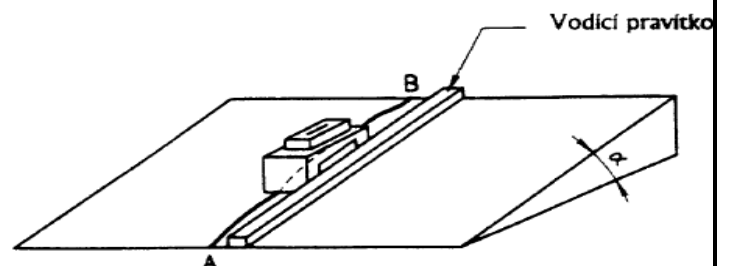
Obr. 10 Grafické zpracování [1]

Úchylka přímosti je zde definována jako vzdálenost mezi dvěma přímkami rovnoběžnými s reprezentativní přímkou, které se dotýkají křivky v nejvyšším a nejnižším bodě.

Požívané metody

Metoda měření vodováhou

Měřidlem je vodováha, která se přemisťuje podél měřené čáry. Základnou měření je vodorovná poloha měřidla, které měří malé úhly ve svislé rovině. Není-li měřená čára vodorovná, umísťuje se vodováha na můstek s vhodným sklonem. Pro zachování stále stejné orientace se používá vodící pravítko.

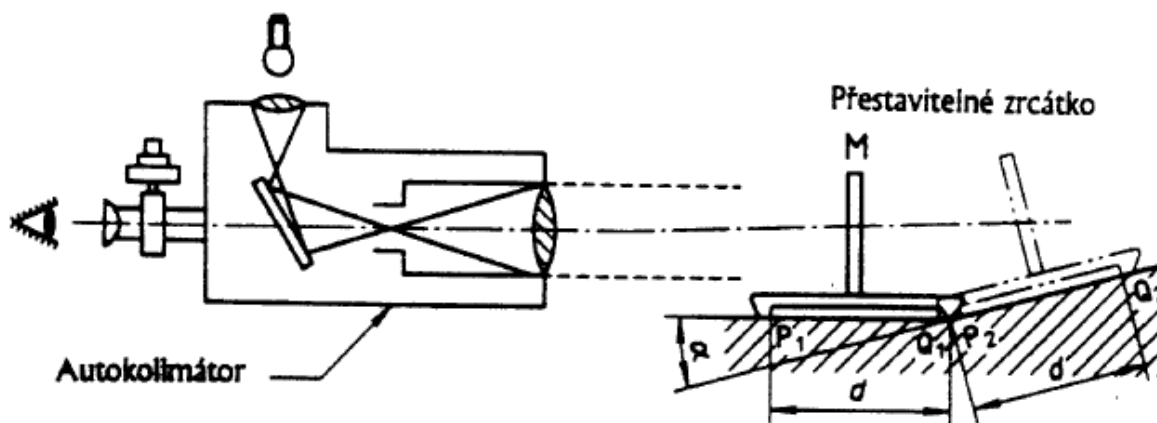


Obr. 11 Měření vodováhou [1]

Autokolimační metoda

U této metody, využívající sousose namontovaný autokolimátor, způsobí jakékoliv natočení přestavitelného zrcátka M kolem vodorovné osy svislou změnu obrazu nitkového

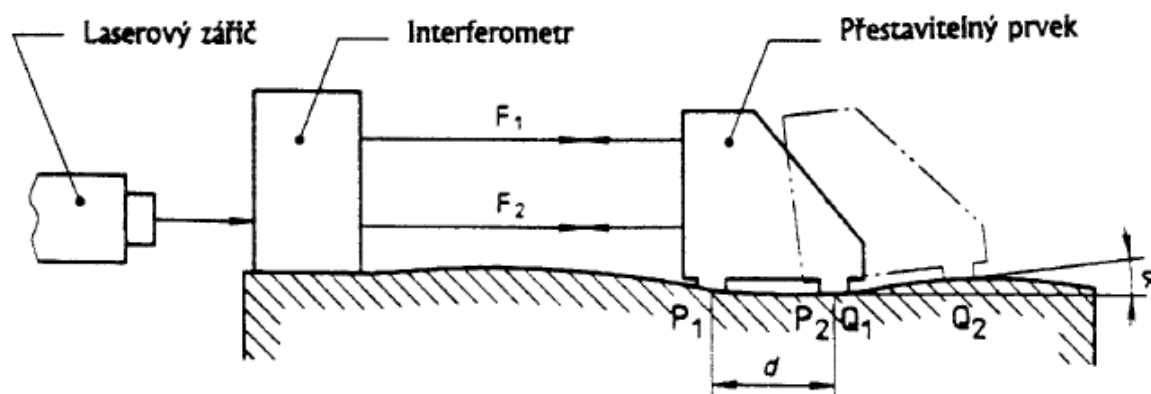
kříže v ohniskové rovině. Změření této změny polohy pomocí okulárového mikrometru umožní určit úhlovou úchylku držáku zrcátka.



Obr. 12 Měření autokolimátorem [1]

Laserinterferometrická metoda (Měření úhlů)

Interferometr je pevně upevněn na součásti, na které se nachází měřená čára. Základna měření je tvořena rovnoběžnými paprsky F_1 , F_2 vycházející z interferometru.



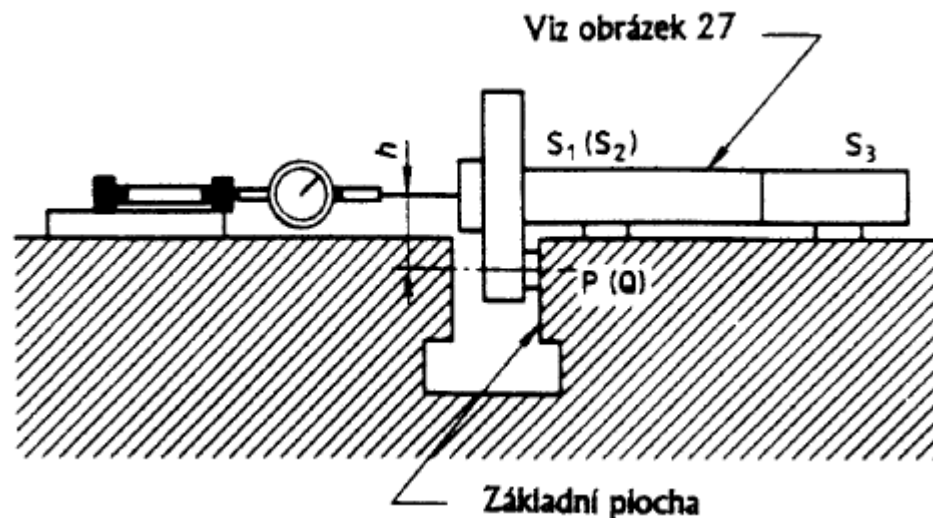
Obr. 13 Měření laser interferometricky [1]

1.1.2 Přímota součástí

Definice a metody měření jsou obdobné jako při měření přímoti čáry

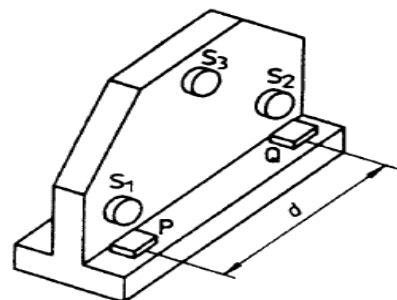
Vodící drážky a základní plochy stolů

Při přímém měření úchylek musí přístroj odměřovat úchylky v rovině kolmé na čáru pomocí bodů P nebo tak, aby h bylo nejmenší. [1]



Obr. 14 Přímé měření úchylek [1]

Při měření úhlových úchylek je vzdálenost d určena rozteč bodů měření. Přemísťovaný prvek musí ležet na vodorovné ploše stolu a opřen na vhodně zvolených ploškách S_1, S_2, S_3) a musí mít dvě funkční nosné plochy P a Q .

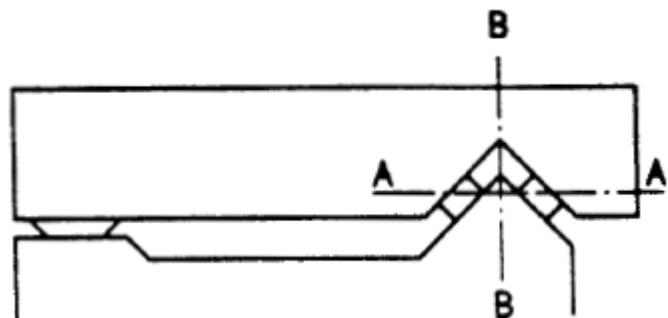


Obr. 15 Měření úhlových úchylek [1]

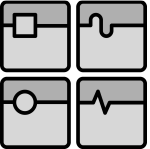
Vodící plochy

– Prizmatické plochy

Přemísťovaný prvek musí na vodících plochách umístěn na čtyřech dotkových bodech, aby byl stabilní, a musí být opřen v přídavném bodě na jiné vodící ploše.

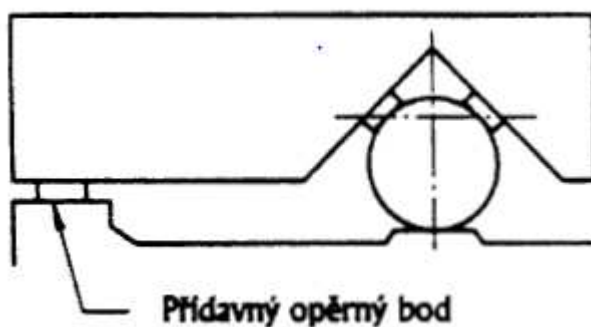


Obr. 16 Použití odlehčeného prizmatu [1]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 22
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Úchylka přímosti by měla být měřena ve funkční rovině. Za ní může být považovaná buď vodorovná (AA) nebo svislá (BB) rovina. Za určitého uspořádání stroje se mohou vyskytnout výjimky.

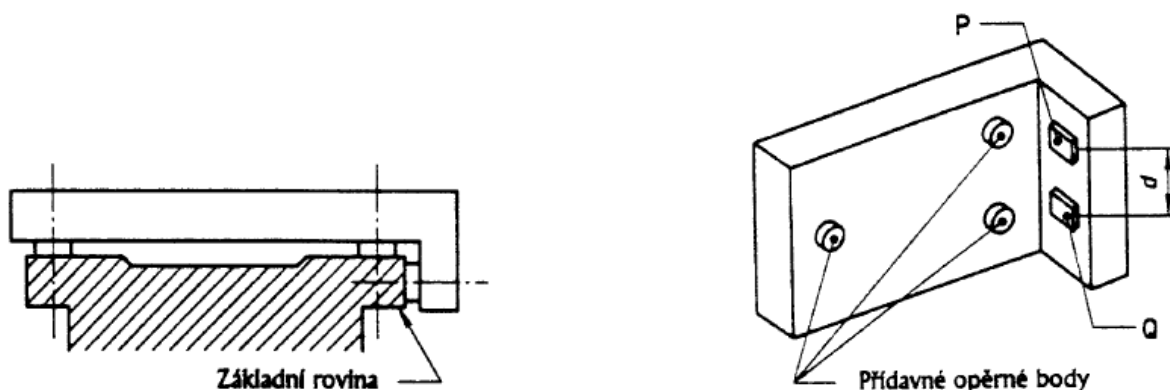
– *Válcové plochy*



Obr. 17 Měření válcových ploch [1]

– *Jednotlivé svislé plochy*

Těleso se měřené plochy dotýká v bodech P a Q. K vedení je zapotřebí tří přídavných bodů, které musí zajistit vedení a nesmí ovlivňovat polohu funkčních dotykových bodů.

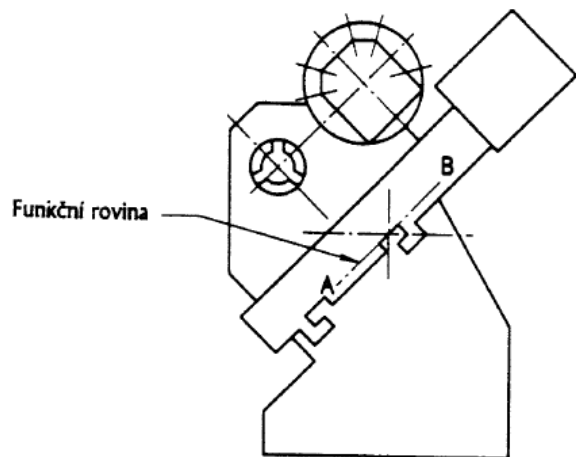


Obr. 18 Měření svislých ploch [1]

– *Šikmé lože*

Funkční rovina svírá s vodorovnou rovinou určitý úhel. Úchylka se měří ve funkční rovině.

Obr. 19 Měření na šikmém loži [1]



1.1.3 Přímost pohybu

Měření přímočarosti pohybu částí stroje je požadováno nejen z důvodu toho, aby se zjistilo, zda budou produkovány rovinné a přímé obrobky ale také proto, že na přímočarém pohybu závisí přesnost polohy bodu obrobku.

Přímočarý pohyb se vždy skládá ze šesti složek úchylek

- Jedna úchylka ve směru pohybu
- Dvě lineární úchylky dráhy bodu na pohybující se části
- Tři úhlové úchylky pohybující se části

Metody pro měření přímosti pohybu jsou obdobné jako v předcházejícím bodě.

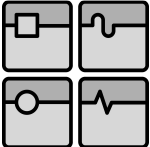
1.2 Měření rovnoběžnosti, shodnosti vzdáleností a souososti

Rozlišuje se:

- ❖ Rovnoběžnost čar a rovin
- ❖ Rovnoběžnost pohybu
- ❖ Shodnost vzdáleností
- ❖ Shodnost os, souosost

1.2.1 Rovnoběžnost čar a rovin

Čára je považována za rovnoběžnou s rovinou, pokud při měření vzdálenosti této čáry od reprezentativní přímky průsečnice této roviny s rovinou na tuto rovinu kolmou a procházející několika body dané čáry nepřekročí největší rozdíl zjištěných hodnot v daném rozsahu měření předem určenou hodnotu. [1]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 24
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Dvě čáry jsou považovány za rovnoběžné, když jedna z čar je rovnoběžná se dvěma rovinami, procházejícími reprezentativní přímkou druhé čáry. Tolerance rovnoběžnosti ve dvou rovinách nemusí být nutně shodné. [1]

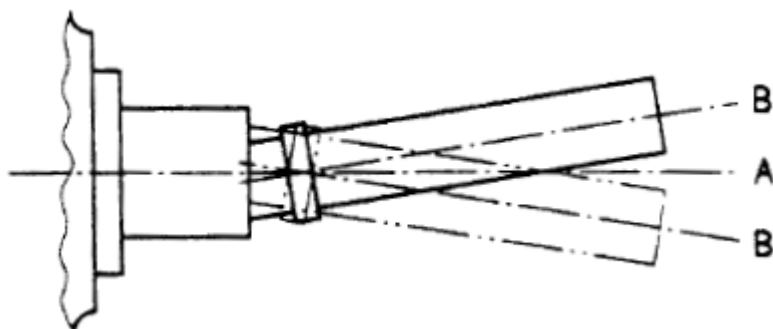
Dvě roviny jsou považovány za rovnoběžné, když největší rozsah vzdálenosti reprezentativní roviny jedné z nich, od druhé roviny, měřený přes celý povrch nejméně ve dvou směrech, nepřekročí v určené délce předepsanou hodnotu. [1]

Metody používané při měření

Všeobecné pro osy

Při měření rovnoběžnosti jsou osy nahrazeny velice přesnými válci. Jestliže povrch vřetena nesplňuje požadované předpoklady na přesnost, použije se pomocná válcová plocha (měřicí trn). Upevnění a vystředění trnu se provádí na konci hřídele nebo ve válcovém, kuželovém otvoru. Je

zřejmé, že trn nelze vystředit přesně při otáčení vzniká paraboloid a v rovině měření zaujímá dvě polohy B-B'.



Obr. 20 Měřicí trn [1]

Rovnoběžnost dvou rovin

Měření se provádí nejlépe v dvou, vzájemně kolmých směrech a lze ji změřit např.:

Vodováhou

Vodováha se umísťuje na můstek, který spojuje obě porovnávané roviny. Odečte se řada hodnot po celé délce rovin, největší rozdíl odečtených hodnot (úhlů) udává úhlovou úchylku rovnoběžnosti, vynásobením délkou l dostaneme délkovou úchylku rovnoběžnosti.

Rovnoběžnost dvou os

Provádí se ve dvou rovinách

- V rovině, procházející dvěma osami
- V druhé rovině, pokud možno kolmé k první

– Rovina procházející dvěma osami

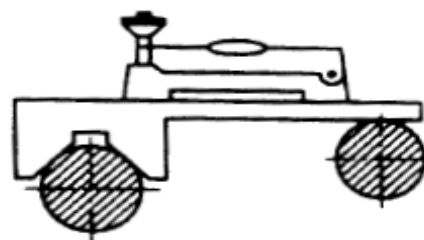
Měřidlo je umístěno na držáku se základnou vhodného tvaru, tak aby se mohlo posouvat po válci, který představuje jednu z os. Dotek měřidla klouže po válci představující druhou osu. Aby se zjistila nejmenší odečítaná hodnota je potřeba měřidlem kývat. Je-li to zapotřebí, uvažuje se i průhyb válce.



Obr. 21 Měření dvou os [1]

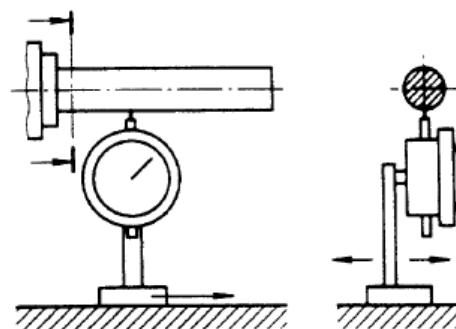
– Druhá rovina kolmá k první

Tato metoda vyžaduje pomocnou rovinu, rovnoběžnou s oběma osami. Jestliže tato rovina existuje, tak a tyto dvě osy jsou rovnoběžné s nějakou plochou stroje a může být rovnoběžnost každé z nich určena samostatně. Pokud tomu tak není, musí být použita vodováha s nastavitelnou libelou umístěna na dva válce představující osy. Nejsou-li osy ve stejné výšce, používá se pevný nebo nastavitelný můstek.



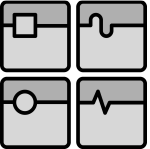
Obr. 22 Můstek pro měření os [1]

Rovnoběžnost osy s rovinou



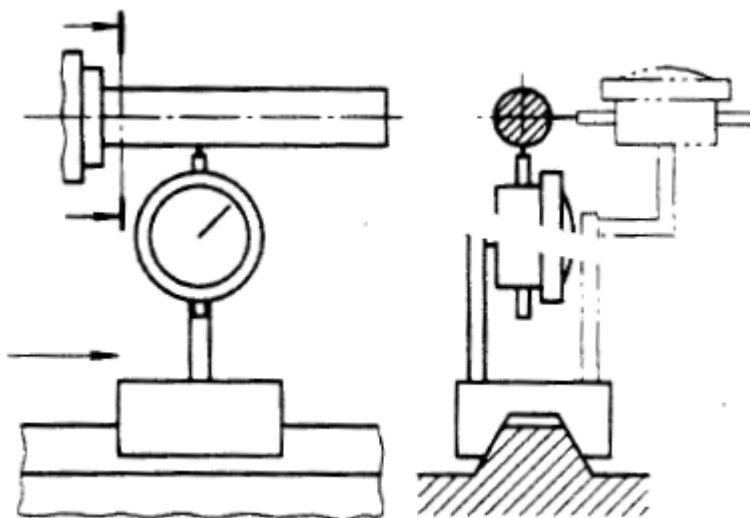
Obr. 23 Osa s rovinou [1]

Měřidlo je upnuto v držáku se základnou a posouvá se po určených úsecích. Dotek opět klouže po válci představující osu a zjišťuje se nejmenší hodnota rozkříváním.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 26
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Rovnoběžnost osy s průsečnicí dvou rovin

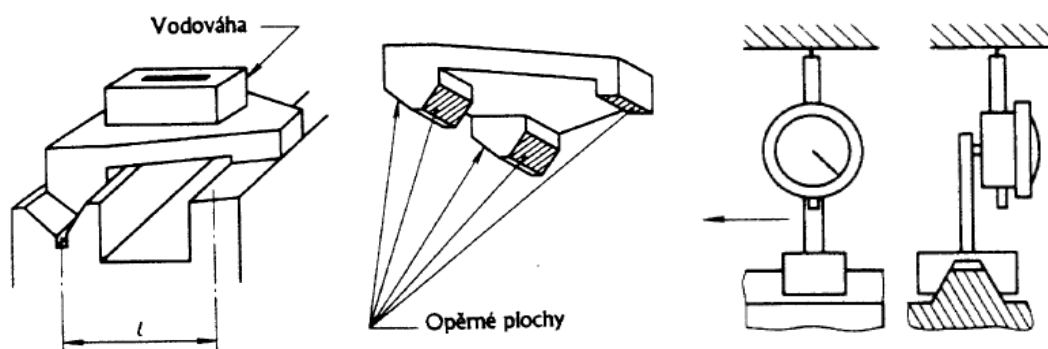
Měření se provádí obdobně jako v předcházejícím bodě. Měli by být vybrány kolmé roviny považované za nejdůležitější s ohledem na činnost stroje.



Obr. 24 Osa s dvěma rovinami [1]

Rovnoběžnost průsečnice dvou rovin s třetí rovinou

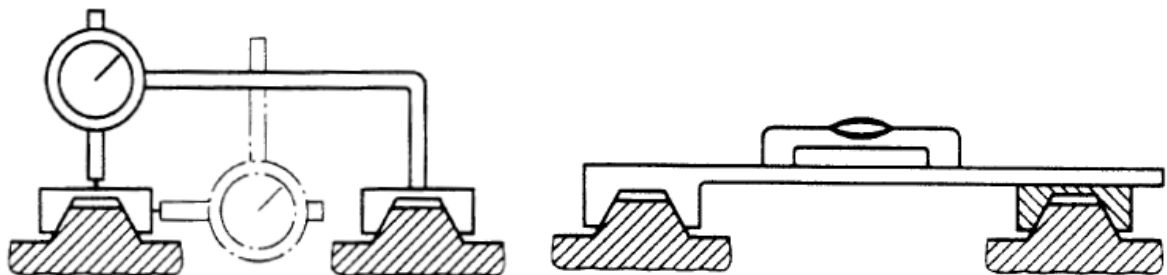
Je-li vzájemná poloha třetí roviny vhodná, použije se speciální můstek a vodováha. Není-li tomu tak využije se držák s úchylkoměrem.



Obr. 25 Průsečnice dvou rovin s třetí rovinou [1]

Rovnoběžnost dvou přímek, z nichž každá je průsečnicí dvou rovin

Měří se vždy ve dvou vzájemně kolmých rovinách. Metoda vyžaduje tuhý přípravek to lze zajistit jen při malých vzdálenostech. Obvykle se používá vodováha.



Obr. 26 Rovnoběžnost dvou přímek [1]

1.2.2 Rovnoběžnost pohybu

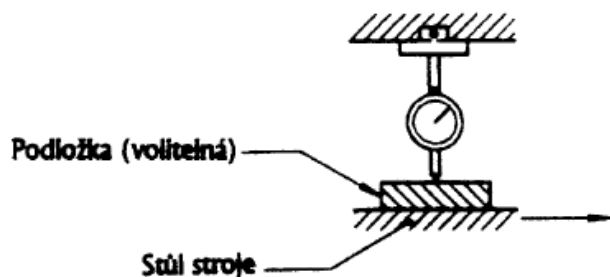
Rovnoběžnost pohybu se vztahuje k poloze dráhy funkčního bodu pohybující se části stroje vzhledem k:

- Rovině
- Přímce
- Dráze bodu jiné pohybující se části stroje

Rovnoběžnost dráhy s rovinou

- *Rovina je pohybující se částí*

Úchylkoměr je upevněn na nepohyblivé části stroje a dotek je kolmo na kontrolovanou plochu. Pohybující se část se posouvá po určitých úsecích. Toto je typické pro brusky a pro frézky.

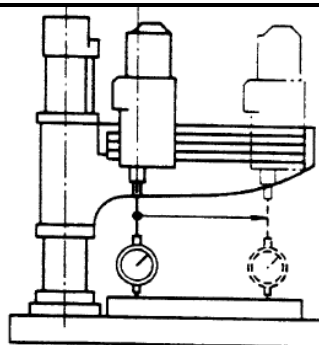


Obr. 27 Rovina je pohybující se částí [1]

- *Rovina není na pohybující se části*

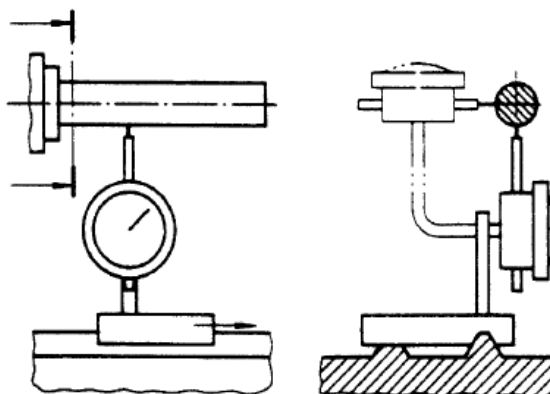
Měřidlo je upevněno na pohybující se části a pohybuje se s ní po určených úsecích. Dotyk je v kolmé poloze na měřenou plochu a klouže po ní.

Obr. 28 Rovina není pohybující se částí [1]



Rovnoběžnost dráhy s osou

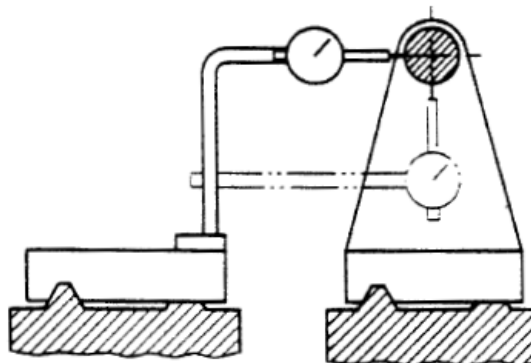
Měřidlo je upevněno na pohybující se části a pohybuje se s ní po určených úsecích. Dotek klouže po válci nebo trnu, představující osu. Pokud je to možné, měří se ve dvou vzájemně kolmých rovinách.



Obr. 29 Rovnoběžnost dráhy s osou [1]

Rovnoběžnost dvou drah

Úchylkoměr je upevněn na jedné z pohybujících se částí a dotek je soustředěn do určeného bodu na druhé části stroje. Obě části se pohybují ve stejném smyslu po stejných úsecích.



Obr. 30 Rovnoběžnost dvou drah [1]

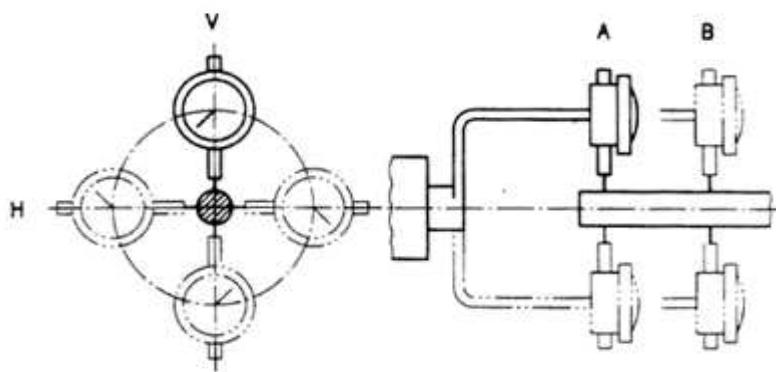
1.2.3 Shodnost vzdáleností

Shodnost vzdáleností je vzdálenost os od základní roviny. Shodnost vzdáleností je v tom případě, když rovina procházející osami je rovnoběžná se základní rovinou. Osy mohou být buď různé osy, nebo to může být jedna osa, mající při natáčení různé polohy.

1.2.3 Souosost, shodnost os

Dvě čáry nebo dvě osy jsou souosé, když jejich relativní vzdálenost měřená ve více bodech nepřekračuje určitou hodnotu.

Měřidlo je upevněno na ramenu, které se otáčí o 360° . Dotyk je na válci, který představuje druhou osu. Každá změna představuje dvojnásobek úchyly souososti. Jelikož ve zvoleném řezu může dojít k tomu, že se v něm obě osy protínají, volí se druhý řez, ve kterém se provede opět měření



Obr. 31 Souosost [1]

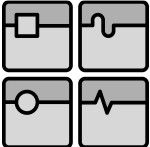
1.3 Měření kolmosti

Kolmost lze opět rozdělit na:

- Kolmost přímek a rovin
- Kolmost pohybu

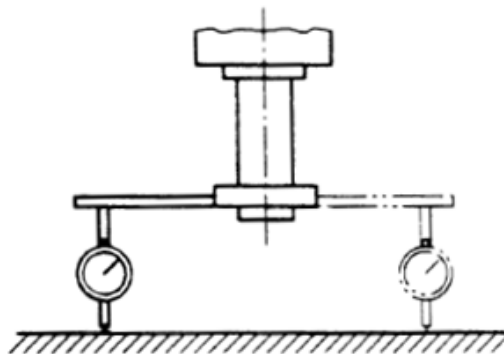
1.3.1 Kolmost přímek a rovin

Dvě roviny, dvě přímky nebo přímka a rovina jsou kolmé, jestliže úchylka rovnoběžnosti se vzorovým úhelníkem nepřekročí předepsanou hodnotu. Úhelník může být metrologický úhelník nebo rámová vodováha.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 30
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Metody měření

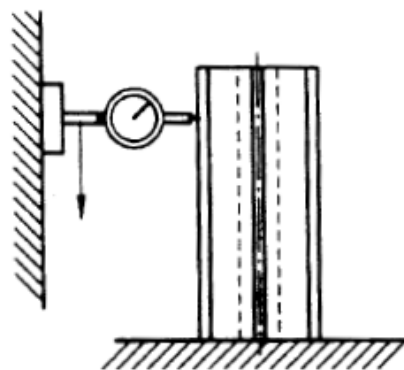
Jak již bylo řečeno, měření kolmosti je v podstatě měření rovnoběžnosti. Pro osu otáčení lze použít následující metodu. Úchylkoměr na ramenu je upevněn ve vřetenu. Při otáčení opisuje úchylkoměr kružnici, jejíž rovina je kolmá na osu otáčení. Sledováním kontrolované roviny dotelem měřidla můžeme zjistit úchylku rovnoběžnosti.



Obr. 32 Měření kolmosti [1]

Dvě roviny svírající úhel 90°

Válcový úhelník se ustaví na jednu rovinu. Číselníkový úchylkoměr se pohybuje po druhé rovině a po pravidelných úsecích odečítá hodnoty. Válcový úhelník se otočí o 180° a měření se opakuje.

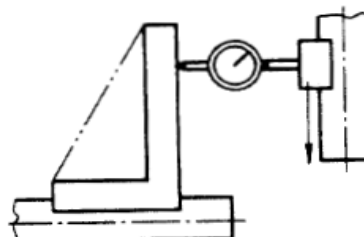


Obr. 33 Dvě roviny [1]

Dvě osy svírající úhel 90°

– *Obě osy jsou pevné*

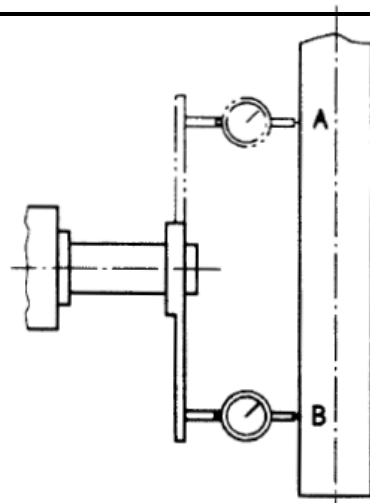
Úhelník s vhodnou základnou se umístí na válec, představující jednu z os.



Obr. 34 Pevné osy [1]

– *Jedna z os je osa otáčení*

Úchylkoměr je upnut na ramenu, který je upevněn na trnu představující osu otáčení a při otáčení se umístí do dotyku s válcem, který představuje další osu v bodech A a B. Rozdíl odečtů je vyjádřen ve vztahu k vzdálenosti AB.



Obr. 35 Osa otáčení [1]

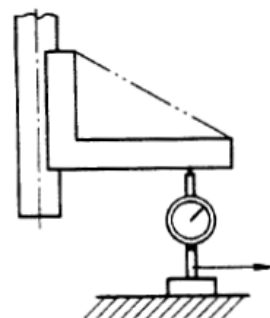
Osa a rovina svírají úhel 90°

– *Pevná osa*

Úhelník se ustaví na válec představující osu.

– *Osa otáčení*

Měří se rovnoběžnost volného ramena s rovinou ve dvou vzájemně kolmých směrech.

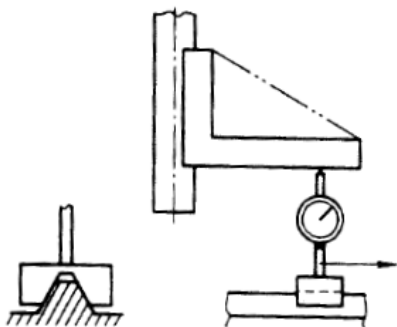


Obr. 36 Pevná osa [1]

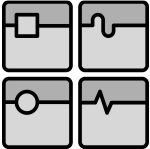
Osa svírající s průsečnicí dvou rovin úhel 90°

– *Pevná osa*

Úhelník se základnou se ustaví na válcí představujícím osu. Měří se rovnoběžnost volného ramena s průsečnicí.

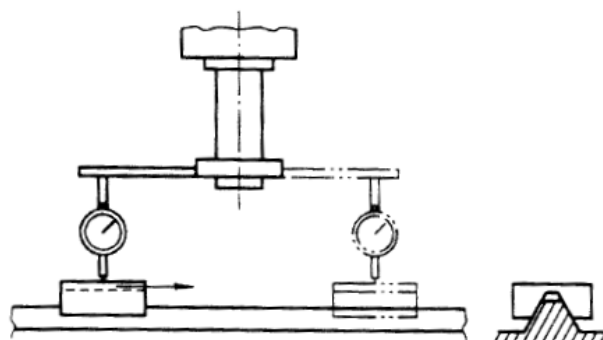


Obr. 37 Pevná osa s průsečnicí [1]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 32
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

– osa otáčení

Úchylkoměr je upnut na ramenu a upevněn ve vřetenu. Dotek se opírá o prizmatický blok umístěn na protínajících se plochách. Vřeteno se pootočí o půl otáčky a prizmatický blok se posune tak, aby se úchylkoměr dotýkal ve stejném bodu.



Obr. 38 Osa otáčení s průsečnicí [1]

1.3.2 Kolmost pohybu

Kolmost pohybu se vztahuje na pohybující se část stroje měřená k:

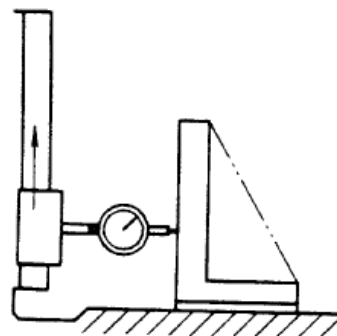
- rovině
- přímce
- dráze bodu jiné pohybující se části

Metody měření

Pohybující se část by měla být poháněna obvyklým způsobem, aby se projevil vliv vůle a nepřesností vodících ploch.

Kolmost dráhy k rovině

Úhelník je umístěn na rovině. Měří se rovnoběžnost pohybu s volným ramenem ve dvou kolmých směrech.

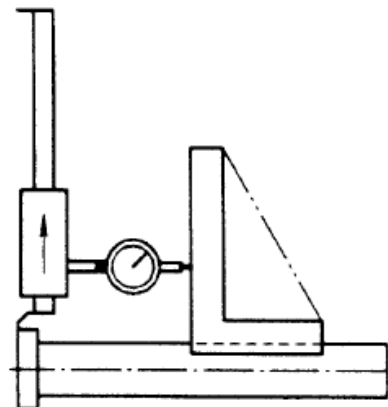


Obr. 39 Kolmost dráha-rovina [1]

Kolmost dráhy k ose

Úhelník s vhodnou základnou se umísťuje na válec představující osu. Je-li osa osou otáčení, pak trn představující osu se nastaví v rovině měření do střední polohy obvodového házení.

V případě, že se jedná o vřeteno soustruhu, který umožňuje montáž lícní desky, použije se tato deska.



Obr. 40 Kolmost dráha-osa [1]

1.4 Obvodové házení

Neokrouhlost

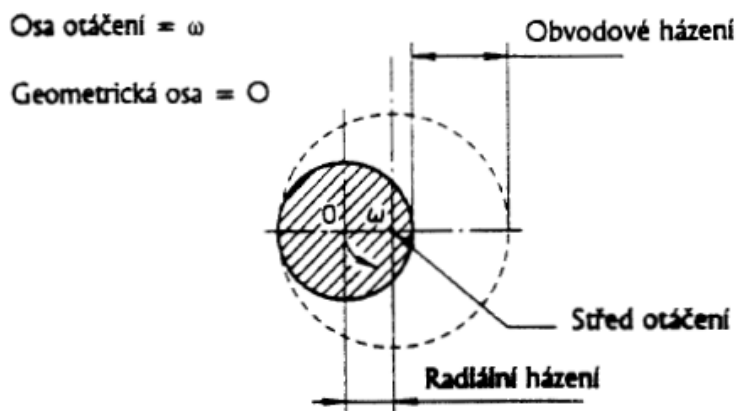
Je úchylka kruhového tvaru součásti v rovině kolmé na osu. U hřídelů je hodnota určena rozdílem mezi průměrem opsané kružnice a nejmenším změřitelným průměrem hřídele. U děr se porovnává průměr vepsané kružnice a největším změřitelným průměrem díry.

Výstřednost

Je vzdálenost mezi dvěma osami když jedna se otáčí kolem druhé.

Radiální házení osy

Pakliže geometrická osa není přesně osou otáčení.



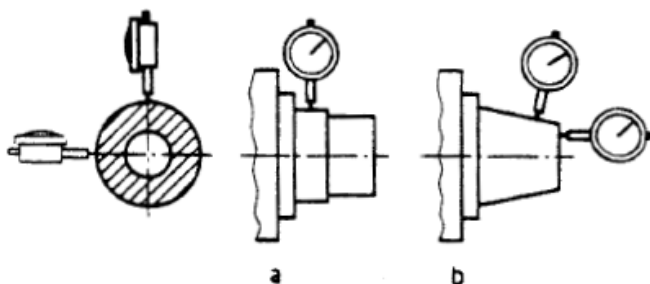
Obr. 41 Radiální házení [1]

Není-li vzata v úvahu neokrouhlost pak obvodové házení je dvojnásobek radiálního házení.

Měření

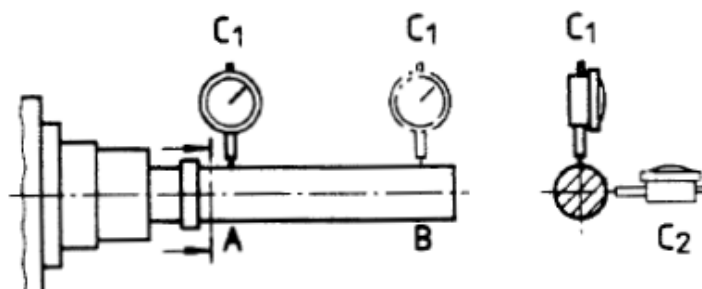
Před tím, než se začne s měřením, by mělo být zajištěno, že vřeteno se bude otáčet dostatečně dlouho. Předpokladem je konstantní rozložení olejového filmu.

Při měření **vnějších ploch** se úchylkoměr nastaví na dotek na plochu a pomalým otáčením vřetena se odečítají údaje. Po kuželové ploše se dotyk nastaví kolmo k ploše. Z důvodu axiálního pohybu (vůle v ložiscích) při pohybu dojde k měření na větší kružnici a tím k většímu obvodovému házení. Proto se kužel používá jen v případě malé strmosti.



Obr. 42 Vnější plochy [1]

U **vnitřních ploch** pokud lze do válcové nebo kuželové díry vložit úchylkoměr využije se měřicího trnu. Vyčnívající část se použije k měření. Měření se provádí obvykle ve dvou řezech, první se volí v místě upevnění a druhý v určité vzdálenosti.



Obr. 43 Vnitřní plochy [1]

1.5 Čelní házení

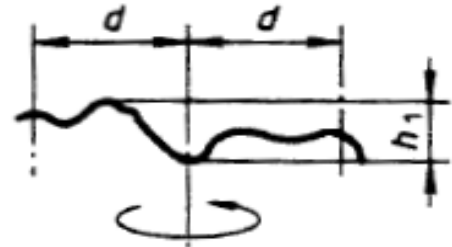
Čelní házení plochy otáčející se kolem osy:

- čelní házení plochy

je vadou rovné plochy, která není v rovině kolmé k ose otáčení. Čelní házení je dáno vzdáleností H dvou rovin kolmých na osu, mezi kterými se pohybují body plochy během otáčení. [1]

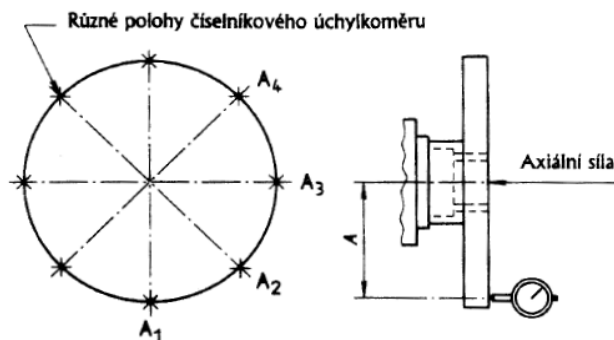
- Čelní házení plochy ve vzdálenosti d od osy

Toto je představováno vzdáleností h dvou rovin kolmých na tuto osu, mezi kterými se pohybuje část plochy omezená otáčejícím se válcem o průměru $2d$, která má jako osu symetrie teoretickou osu otáčení plochy.[1]



Obr. 44 Čelní házení [1]

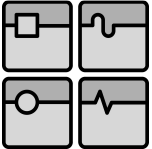
Měření



Obr. 45 Měření na lící desce [1]

Čelní házení se týká především lícních desek. Úchylkoměr se umísťuje do vzdálenosti A od středu kolmo na čelo a postupně se přemísťuje po několika bodech rozmístěných po obvodu. Rozdíl nejmenší a největší hodnoty v každém bodě znamená: největší z rozdílů je úchylka čelního házení. Vřeteno se má pomalu otáčet a mělo by být na konci zatíženo, aby se vyloučil vliv axiální vůle v ložiscích.

V této kapitole jsou popsány zkoušky geometrické přesnosti podle ČSN ISO 230-1. Tato norma popisuje podrobně metody a pomůcky, kterými lze zkoušky geometrické přesnosti provádět. Norma ČSN ISO 230 zahrnuje i další oblasti měření, které lze na stroji provádět.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 36
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

2. PŘEHLED PŘÍSTROJŮ VYBRANÝCH VÝROBCŮ

Pro měření **přímosti** se využívá vodováh, autokolimátoru, moderní metody využívají laseru.

2.1 Vodováhy

Moderní vodováhy jsou vybaveny elektronickými prvky.

STABILA Typ 196-2 elektronik se vyrábí v rozpětí 60-180cm.

- Dva digitální displeje
- Přesnost měření libely v normální poloze 0,5 mm/m



Obr. 46 STABILA 196-EL [4]

Firma STABILA však drží krok i se současnými trendy, ve kterých se využívá laseru.

STABILA LMX

Laserová vodováha Typ 80 LMX-S

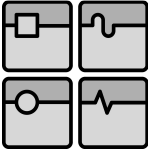
Horizontální libela pro větší preciznost s 5násobnou citlivostí oproti běžným libelám.

Masivní celokovová nivelační podložka pro jisté uchycení. Silný trvalý magnet pro uchycení bez vůle.



Obr. 47 STABILA LMX [5]

Tyto vodováhy lze považovat za obecné a lze je použít v obecných aplikacích. Ve strojírenství se používají **strojní vodováhy**.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 37
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Strojní vodováha QUANTUM

Přesnost 0,02mm/m

Přesnost strojní vodováhy je mnohem lepší než u obyčejných vodováh.



Obr. 48 Vodováha QUANTUM [6]

Výrobou strojních vodováh se z českých firem zabývá firma KIMEX



Obr. 49 Vodováhy KINEX [7]

Úhlová vodováha

Přesnost standartní verze

0,02mm/m

Obr. 50 Úhlová vodováha WYLER [8]



2.2 Autokolimátor

Optický autokolimátor

Ohnisková vzdálenost - 500mm

Přesnost - 2 úhlových vteřin

Úhlové rozlišení - 0,3 úhlových vteřin

Tyto autokolimátory mají modulární konstrukci a doplňky, které umožňují zvýšení rozlišení. Např. U autokolimátoru s ohniskovou vzdáleností 500m lze s použitím digitálního enkodéru zpřesnit úhlové rozlišení na 0,2''.



Obr. 51 Optický autokolimátor [9]

Elektronický autokolimátor

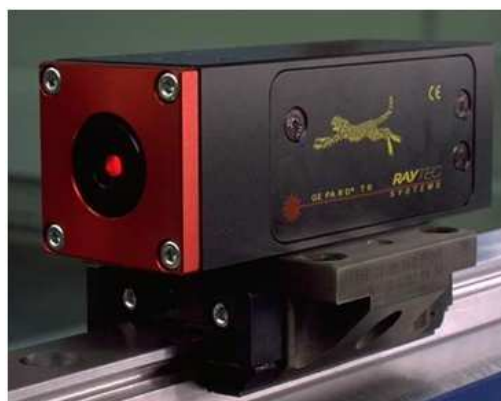
Dvouosý digitální autokolimátor umožňuje měření úhlů s přesností $0,2''$ v rozlišení $0,1''$.



Obr. 52 Elektronický autokolimátor [10]

2.3 Gepard

Firma RAYTEC SYSTEMS vyvinula měřicí systém s označením GEPARD



Obr. 53 Gepard [12]

RAYTEC gepard je laserový měřicí přístroj vybaven nejmodernějšími optickými a elektronickými prvky, který se využívá pro měření **přímosti**.

Opakovatelnost u tohoto systému – $0,25\mu\text{m}$

Průměr paprsku – 6mm

2.4 Úchylkoměr

Pro měření **rovnoběžnosti** se nejčastěji využívá číselníkového úchylkoměru.



Obr. 54 Číselníkový úchylkoměr [14]

Obr. 55 Digitální úchylkoměr [13]

Úchylkoměr od firmy OXFORD

- Dílek stupnice 0,01mm
- Zdvih 10mm

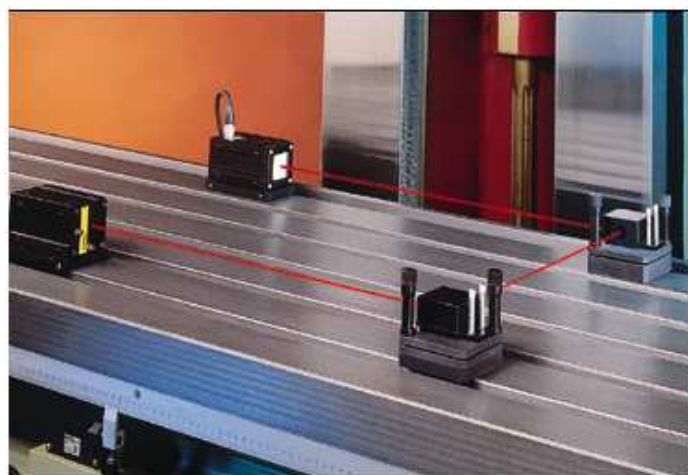
Digitální úchylkoměr MAHR 1075

- Rozsah měření – 12,5mm
- Číslicový krok – 0,01mm

2.5 Laserový paprsek

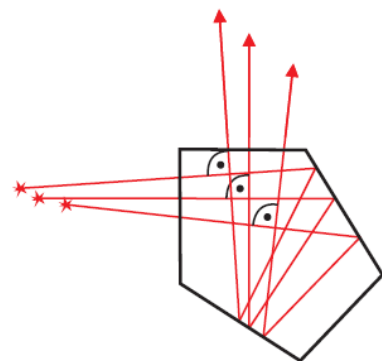
Měření **rovnoběžnosti** CCD kamerou

Obr. 56 Měření CCD kamerou [15]



Měření rovnoběžnosti je v podstatě měření dvou přímostí kdy se laserový paprsek odkloní o 180° pomocí pentagonální hranolů.

Z obrázku 50. je patrná funkce pentagonálního hranolu. Úhel mezi vstupujícím a vystupujícím paprskem je vždy 90° .



Obr. 57 Pentagonální hranol [16]

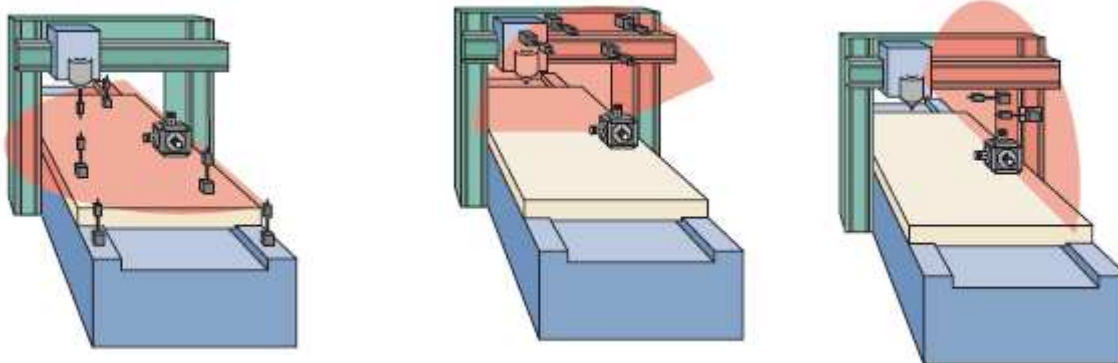


Obr. 58 Jemně nastavovací jednotka pentagonálního hranolu [16]

Přístroj L-743 společnosti HAMAR LASER

Tento přístroj lze využít v mnoha aplikacích. Při měření přesnosti obráběcích strojů ho lze využít při měření:

Obr. 59 Hamer laser [17]



Obr. 60 Měření pomocí Hamer laseru – rovinnost, kolmost, přímost [17]

2.6 Laser tracker

Laser tracker slouží k prostorovému měření, především u velkých strojů. Nemá tak vysokou přesnost opakování jako klasický rovinný Laser interferometr.

- Přesnost 0,003mm/m
- Rozsah 70m

Laser tracker měří dva úhly a vzdálenost. Vysílá paprsek k “odrazce” umístění na měřeném objektu. Odrazka je nejčastěji sférického tvaru.

Obr. 61 Laser tracker FARO [18]



Firmy zabývající se laser trackery

FARO, LEICA, API

API

Laser tracker Tracker3 firmy API je vybaven přesným interferometrem, snímačem absolutní vzdálenosti a digitální záznamovou elektronikou. API minimalizuje systematické chyby, a tím zvyšuje stability, rozsah a přesnost.

- Přesnost - 5 μ m/m
- Rozlišení - 1 μ m
- Opakovatelnost – 2,5nm

LEICA

Robustní konstrukci a vynikající tepelnou stabilitu nabýzí Leica Absolute Tracker. Tracker neslouží pouze pro laboratorní měření. Využívá se samozřejmě i v reálném světě, kde je vystaven okolním vlivům. Leica se snaží, aby tyto vlivy Tracker co nejméně ovlivňovaly.

- Přesnost - 6 μ m/m
- Rozlišení - 2 μ m



Obr. 62 Laser tracker LEICA, API [20, 19]

Při měření **kolmosti** se kromě klasického úchylkoměru využívá také laseru

2.7 Laserová interferometrie

AGILENT je vedoucí společností v oblasti vývoje a výroby měřících, testovacích a monitorovacích zařízení.

Firma AGILENT dodává na trh také Laserové hlavy

- **Agilent 5517**

Laserové hlavy této řady splňují požadavky na velikost a rychlost v konsistentním rozhraní. Vyrábějí se ve čtyřech modelech A, B, C, D. Modely se v podstatě liší jenom v rychlostech osy. Průměr standardního paprsku je 6mm. U modelu 5517C jsou dva různé průměry. Varianta 003 má průměr paprsku 3mm a je určena pro použití s diferenciálním interferometrem. Varianta 009 má průměr paprsku 9mm a používá se ve spojení se tříosým interferometrem.



Obr. 63 Laserová hlava AGILENT 5517 [22]

- **Agilent 10735A**

Tříosý laserový interferometr AGILENT 10735A se používá v mnoha aplikacích, kde je nutná lineární a úhlová kontrola. Interferometr měří zároveň tři měření lineární, sklon a vychýlení.

Výhody:

- Vysoký výkon ukládá nastavení času a zlepšuje výkon systému
- Jednoduchá instalace
- Vysoké úhlové rozlišení pro lepší kontrolu



Obr. 64 Interferometr AGILENT 10735A [22]

Laserový interferometr LASERTEX

Je dvou frekvenční interferometr využívaný převážně při kontrole geometrie obráběcích strojů. Má malou velikost a nízkou hmotnost, což je velmi důležitý faktor pro aplikace. Software je kompatibilní s nejnovějšími Windows Vista.



Obr. 65 Interferometr LASERTEX [23]

Přímost

- Rozsah – 0 -12m
- Přesnost – 0,5%

Kolmost

- Rozsah – 0 -6m
- Přesnost – 2''

Pro měření **rovinnosti** se využívá například přístroj firmy PRUFTECHNIK

Přístroj LEVALIGN od firmy LAMI KAPPA umožňuje rychlé a přesné změření základu stroje, čímž se dosáhne zvýšení jeho celkové spolehlivosti a produktivity. Vyrovnaný základ stroje umožňuje je snadnější usazení a je zárukou bezporuchového provozu.



Obr. 66 Složení systému 5530 [24]

Měření se provádí tak, že se vytvoří síť bodů na měřeném povrchu. Postupně se umístí senzor na měřené body a stisknutím jediného tlačítka se spustí měření a uloží se naměřená data do počítače. Počítač vyhodnotí v každém měřeném bodě rozdíly a na displeji se zobrazí výsledek rovinnosti.

Laser	polovodičový laser GaAlAs
Vlnová délka	670 nm (typická)
Průměr paprsku	přibližně 5 mm
Rozbíhavost paprsku	< 0.2 mrad
Výkon paprsku	< 1 mW
Přesnost	< 0,02 mm/m
Měřicí rozsah	poloměr 20 m; bez limitu v případě použití InfiniSplice™ z LEVALIGN®
Laser třídy	Třída 2; FDA 21CFR 1000 a 1040
Bezpečnostní pravidlo	nedívat se přímo do paprsku
Napájení	9V baterie, IEC 6LR61 (alkalická nebo lithiová)
Provozní doba	50 hodin nepřetržitého provozu v závislosti na typu baterie
Teplotní rozsah	-5°C – 50°C (23°F – 122°F)
Hmotnost	přibližně 2,8 kg

Obr. 67 Technická data LEVELIGN laseru [23]

2.8 Ballbar

Speciální měření jakým je například měření **kruhovitosti** vyžaduje i speciální zařízení.

Takovým zařízením je BALLBAR

Skládá se ze snímače umístěného na teleskopické tyči zakončené kuličkou.

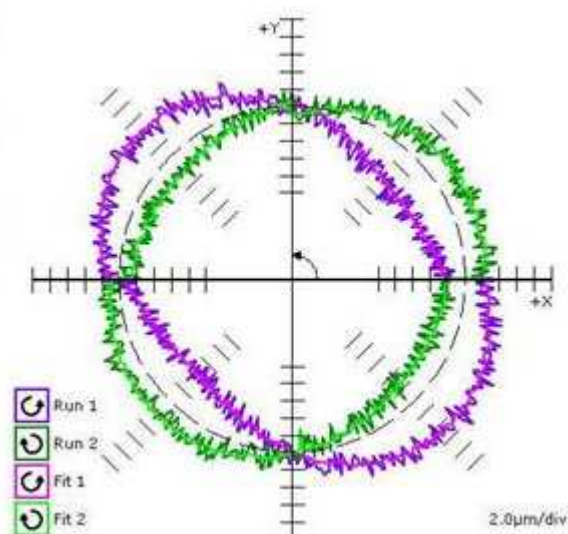
Výhody

- Minimalizuje prostoje
- Zvyšuje výrobní schopnosti
- Umožňuje plánovat údržbu

Obr. 68 Ballbar [25]



Obr. 69 Příklad vykreslení [25]



Špičkou ve vývoji těchto zařízení je firma RENISHAW.

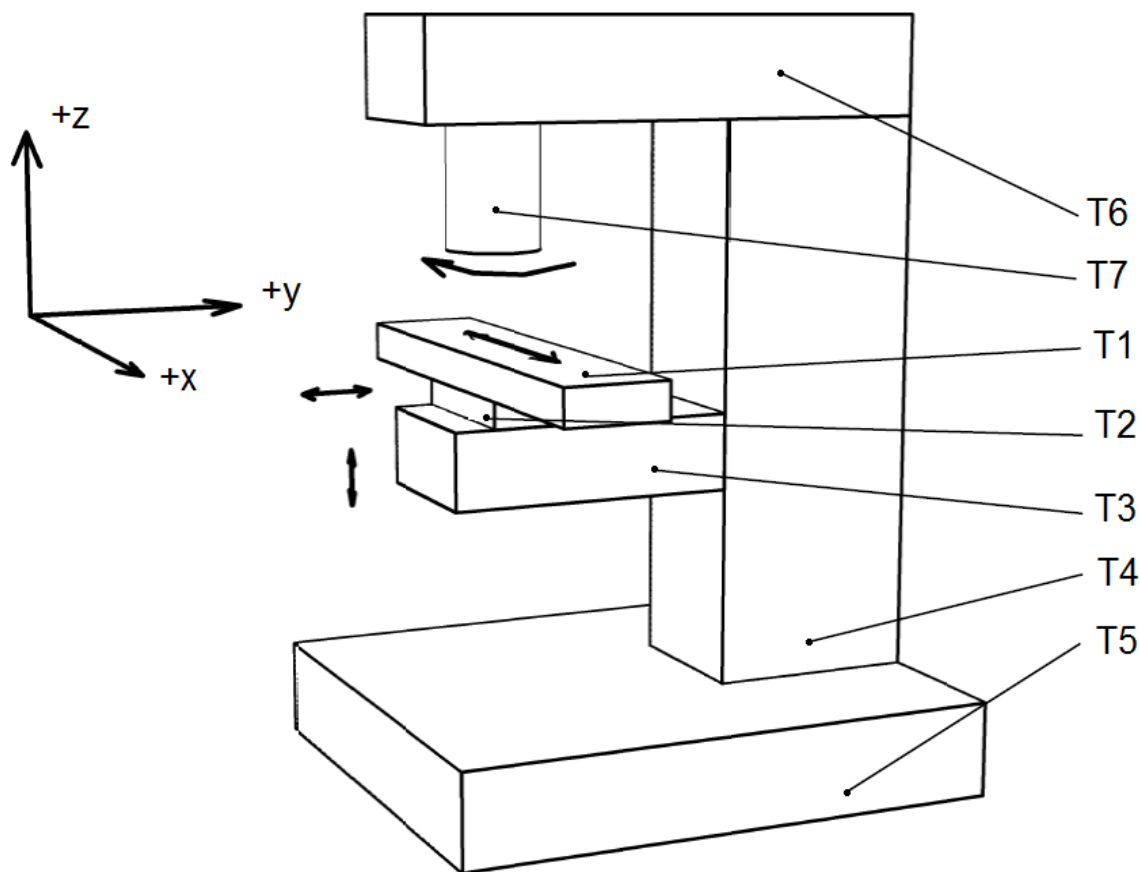
V této části bakalářské práce jsou uvedeny přístroje pro zjišťování geometrických chyb stroje. V současné době jsou přístroje vybaveny moderními optickými prvky, laserem a digitálními, elektronickými prvky. Výrobci měřících přístrojů se snaží tyto metody vyvíjet a přístroje zdokonalovat.

3. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

3.1 Úvod

Matematických modelů využíváme proto, abychom získali představu o chování daného systému. Při tvorbě matematického modelu obráběcího stroje se snažíme získat informaci o výsledných odchylkách, které se projeví na budoucím obrobku. Výsledné chyby tak mohou být promítnuty do modelového (virtuálního) obrobku a pomocí různých úprav (konstrukčních, technologických) tak dále zvyšovat přesnost výrobního stroje.

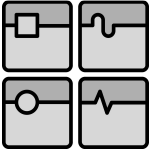
3.2 Analytický výpočet



Obr. 70 Zjednodušený model univerzální frézky

Obr 60. ukazuje model frézky, kde nástroj-fréza je pevně upnut ve vřetenu T7.

Vřeteno T7 - počátek souřadnicového systému O7 je umístěn předním konci vřetene. Osa Z7 je osou vřetene a zároveň osa hlavního řezného pohybu. K ní jsou orientovány osy X7, Y7.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 46
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Vřeteník T6 – bude mít osy $Z7=Z6$. Osy $X6$ a $Y6$ budou rovnoběžné s osami $X7$ a $Y7$. Počátek $O5$ souřadnicového systému bude ležet na stykové ploše vřeteník s vřetenem.

Základní deska T5 - mít osy $Z6=Z5$. Osy $X5$ a $Y5$ budou opět rovnoběžné s osami $X6$ a $Y6$.

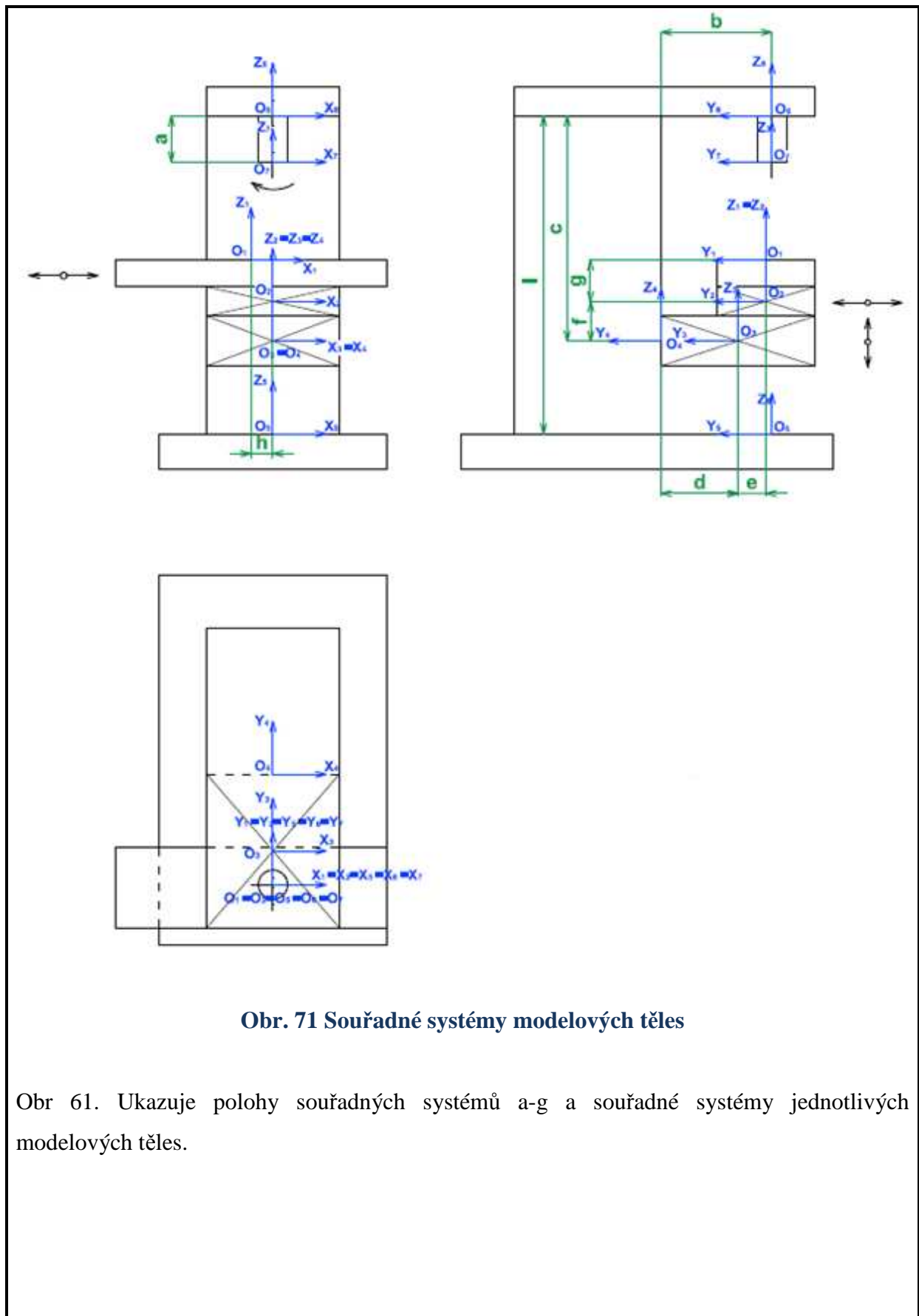
Stojan T4 – jeho souřadnicový systém budu rovnoběžný s dalšími souřadnicovými systémy. Počátek $O4$ souřadnicového systému bude ležet na stykové ploše stojanu s konzolou.

Konzola T3 - bude mít osy $Y4=Y3$. Osy $X3$ a $Z3$ budou rovnoběžné s osami $X4$ a $Z4$. Počátek $O3$ souřadnicového systému bude ležet v průniku úhlopříček konzoly.

Křížový stůl (spodní část) T2 - jeho souřadnicový systém budu rovnoběžný s dalšími souřadnicovými systémy. Počátek $O2$ souřadnicového systému bude ležet v průniku úhlopříček křížového stolu jeho spodní části

Křížový stůl (horní část) T1 - bude mít osy $Z2=Z1$. Osy $X1$ a $Z1$ budou rovnoběžné s osami $X2$ a $Z2$. Počátek $O1$ na horní ploše příčného stolu.

Postup výpočtu je stanoven podle [2]. Tento výpočet udává trajektorii mezi nástrojem a obrobkem. Model je popsán písmenem T od obrobku k nástroji.



Těleso T7 (vřetení): $R_{76}(t)$, $T_{76}(t)$, K_{76}

$$R_{76}(t) = \begin{pmatrix} \cos\gamma_7(t) & -\sin\gamma_7(t) & 0 \\ \sin\gamma_7(t) & \cos\gamma_7(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$T_{76}(t) = 0 \quad (1.2)$$

$$K_{76} = (0, 0, -a)^T \quad (1.3)$$

Těleso T6 (vřeteník): $R_{65}(t)$, $T_{65}(t)$, K_{65}

$$R_{65}(t) = E \quad (1.4)$$

$$T_{65}(t) = 0 \quad (1.5)$$

$$K_{65} = (0, 0, -i)^T \quad (1.6)$$

Těleso T5 (základní deska): $R_{54}(t)$, $T_{54}(t)$, K_{54}

$$R_{54}(t) = E \quad (1.7)$$

$$T_{54}(t) = 0 \quad (1.8)$$

$$K_{54} = (0, -b, (i-c))^T \quad (1.9)$$

Těleso T4 (stojan): $R_{43}(t)$, $T_{43}(t)$, K_{43}

$$R_{43}(t) = E \quad (1.10)$$

$$T_{43}(t) = 0 \quad (1.11)$$

$$K_{43} = (0, -d, 0)^T \quad (1.12)$$

Těleso T3 (konzola): $R_{32}(t)$, $T_{32}(t)$, K_{32}

$$R_{32}(t) = E \quad (1.13)$$

$$T_{32}(t) = (0, 0, S_{z3}(t)) \quad (1.14)$$

$$K_{32} = (0, -e, -f)^T \quad (1.15)$$

Těleso T2 (křížový stůl - spodní část): $R_{21}(t)$, $T_{21}(t)$, K_{21}

$$R_{21}(t) = E \quad (1.16)$$

$$T_{21}(t) = (0, S_{y2}(t), 0) \quad (1.17)$$

$$K_{21} = (h, 0, -g)^T \quad (1.18)$$

Těleso T1 (křížový stůl - horní část): $R_{10}(t)$, $T_{10}(t)$, K_{10}

$$R_{10}(t) = E \quad (1.19)$$

$$T_{10}(t) = 0 \quad (1.20)$$

$$K_{10} = (0, 0, 0)^T \quad (1.21)$$

Kde:

Rtransformační matice rotačního pohybu

T.....transformační vektor přímočarého pohybu

K.....vektor počáteční polohy

E.....jednotková matice

S.....velikost okamžité dráhy

Z těchto rovnic je sestavena výsledná rovnice pohybu nástroje v souřadném systému obrobku O_0

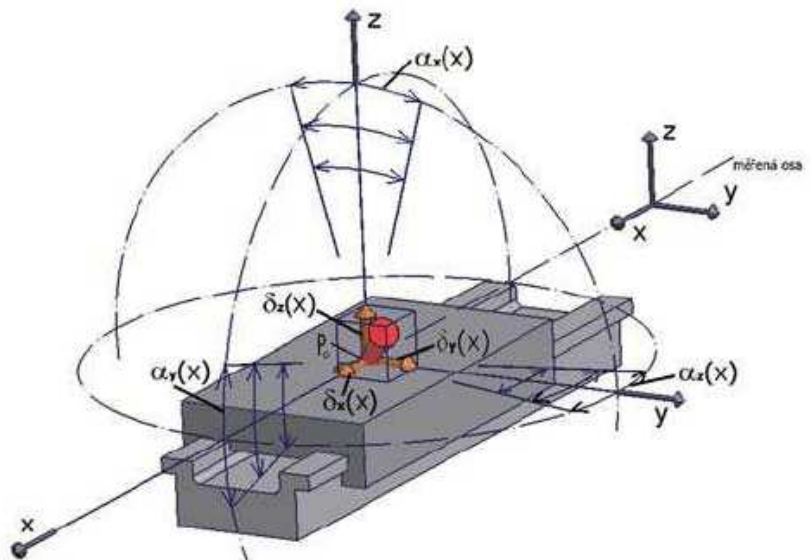
Rovnice trajektorie je podle [2]

$$r_0(t) = \left(\prod_{i=1}^n R_{i,i-1}(t) \right) \cdot r_n + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\left(\prod_{j=1}^i R_{j,j-1}(t) \right) \cdot (T_{i+1,i}(t) + K_{i+1,i}) \right] + T_{10}(t) + K_{10} \quad (1.22)$$

Dále by měli být stanoveny geometrické úchyly stroje proměřením např. laserem. Zanesením těchto chyb do kinematického modelu bude získána mapa nepřesností v pracovním prostoru obráběcího stroje. Tím bude možné predikovat nepřesnosti na budoucím obrobku ovlivněném pouze geometrickou nepřesností stroje.

3.3 Chyby u obráběcího stroje

Obr. 72 Chyby v ose x [3]



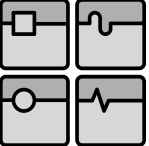
Pro každou osu obráběcího stroje lze vyjádřit šest základních chyb [3]:

Tři úchyly polohy

- $\delta x(x)$ - úchylka přímočarosti
- $\delta y(x)$ - úchylka horizontální
- $\delta z(x)$ - úchylka vertikální

Tři úhlové úchyly

- $\alpha x(x)$ - naklánění
- $\alpha y(x)$ - klopení
- $\alpha z(x)$ - natáčení

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 50
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Tyto úchyly jsou všechny vztaženy k ose x.

Při prostorovém obrábění lze u obráběcího stroje získat 18 chyb pro jednotlivé osy. Je zapotřebí také přičíst tři chyby způsobné nekolmostí mezi dvojicemi os θ_{xy} , θ_{yz} , θ_{xz} . Celkově lze tedy analyticky vyjádřit 21 chyb pro celý stroj, které lze vyjádřit pomocí homogenních transformačních matic (HTM). Pro popis polohy jednoho souřadného systému vůči jinému představuje HTM ve třírozměrném prostoru matici o rozměru 4x4. Prostorovou polohovou odchylku suportu na lineární ose lze díky tomu popsat pomocí jediné HTM.[3]

$$X_p = X + \delta x(x) + [\delta x(y) - y \cdot \alpha z(y)] + [\delta x(y) - y \cdot \alpha z(z) + y \cdot \alpha y(z)] + X_t \quad (1.23)$$

$$Y_p = [\delta y(x) + x \cdot \alpha z(x)] + Y + [\delta y(y) + x \cdot \alpha z(y)] + [\delta y(z) + x \cdot \alpha z(z) - z \cdot \alpha z(z)] + Y_t \quad (1.24)$$

$$Z_p = [\delta z(x) - x \cdot \alpha y(x)] + [\delta z(y) - x \cdot \alpha y(y) + y \cdot \alpha x(y)] + Z + [\delta z(z) - x \cdot \alpha y(z) + y \cdot \alpha x(z)] + Z_t \quad (1.25)$$

Kde: $\delta x(x)$, $\delta y(x)$, $\delta z(x)$ - úchyly polohy (přímočarosti, horizontální, vertikální)
 $\alpha x(x)$, $\alpha y(x)$, $\alpha z(x)$ - úhlové úchyly (naklání, klopení, natáčení)

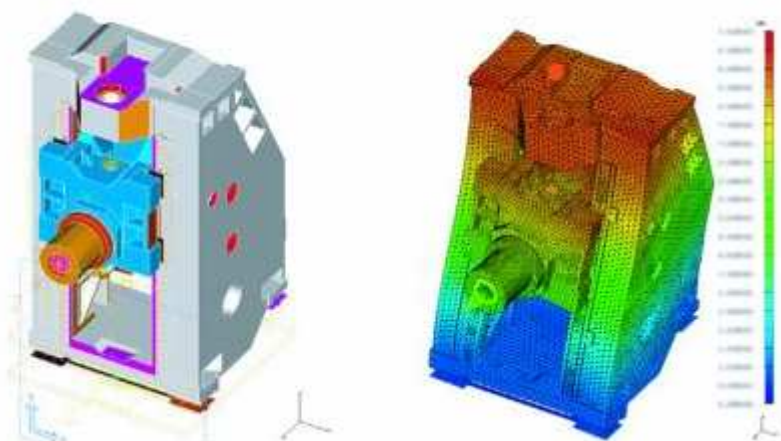
Tyto rovnice již mají obsažené geometrické chyby, ale jsou vztaženy k poloze v souřadném systému. Aby bylo možné aplikovat rovnice 1.23 – 1.25 do rovnice 1.22 musela by být provedena matematická úprava rovnic, kde se vyjádří všechny rovnice jako funkce času nebo polohy.

3.4 Virtuální prototypy

Využití virtuálních prototypů výrazně redukuje čas nutný na vývoj obráběcích strojů. Virtuální prototypy dovolují ověřit a optimalizovat vlastnosti před postavením skutečného prototypu.

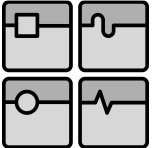
Velká část "nového" stroje je ve skutečnosti modifikací různých uzlů již existujících strojů. Pokud existují digitální modely těchto uzlů, jsou jejich konstrukční úpravy poměrně snadnou záležitostí. Je to právě nutnost konstruovat a testovat prototypy, která prodlužuje čas potřebný k uvedení nového stroje na trh a výrazně zvyšuje náklady vývoje. Výrazný pokrok v počítačových simulacích je dosažen metodou konečných prvků. [26]

Virtuální prototyp existuje pouze v počítači, avšak umožňuje zajistit dostatečně přesně chování stroje. Tyto virtuální prototypy jsou schopny simulovat kinematiku, dynamiku, teplotní problémy i životnost skutečného stroje. A tím lze ukázat na chyby vyskytující se u daného obráběcího stroje.



Obr. 72 Analýza metodou konečných prvků [27]

V této kapitole je přiblíženo matematické modelování chyb u obráběcích strojů. U těchto strojů vznikají chyby jak nepřesnostmi již při výrobě tak samozřejmě v uloženíh. Snahou je tyto chyby najít a odstranit. Je zde jednouchý matematický model, na kterém je popsán analytický výpočet. V dnešní době se do popředí dostávají nástroje využívající virtuální reality. Virtuální prototypy jsou nejčastějšími digitální modely.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 52
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je uvést přehled geometrických chyb, které ovlivňují přesnost obráběcího stroje. V první kapitole jsou popsány nejdůležitější zkoušky geometrické přesnosti, které se v praxi používají. V druhé kapitole jsou uvedeny vhodné přístroje k měření těchto veličin, které jsou výrobci dodávány v současné době na trh. Závěrečná kapitola popisuje matematické modelování kinematiky obráběcího stroje a geometrické chyby vznikající u obráběcího stroje.

Geometrická přesnost obráběcího stroje je ovlivněna několika parametry vztahující se k obráběcímu stroji. Geometrické zkoušky jsou hlavním nástrojem kontroly obráběcího stroje, které jsou popsány v normách ČSN ISO 230. Normy obsahují podrobné informace o prováděných zkouškách, jejich definice a metody, kterými lze tato měření provádět. Výrobci měřících přístrojů, používaných pro tyto zkoušky, se snaží vyvíjet stále modernější a propracovanější přístroje. Jejich cílem je zdokonalovat tyto přístroje, aby vyhověli všem požadavkům na ně kladené. V dnešní době se v tomto odvětví uplatňují přístroje založené na optických metodách. Nejpoužívanějším typem jsou přístroje využívající laseru, které jsou však finančně náročnější. Jejich přesnost je však v porovnání s jinými metodami mnohem lepší. Matematickým modelem lze zjistit geometrické chyby ještě před samotným vyrobením stroje. Analytický výpočet, který byl proveden ve třetí kapitole, popisuje trajektorii nástroje vůči obrobku. Nejsou v něm zavedeny geometrické chyby, které lze zjistit proměřením stroje.

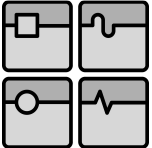
Měření geometrické přesnosti obráběcího stroje je základním úkonem pro kontrolu stroje výrobcem, který tak dokládá zákazníkovi schopnost stroje dodat budoucím obrobkům požadované rozměry a jejich tolerance. Pokud na obráběcí stroji není dosaženo přesnosti odpovídající všeobecným normám, může potom obrobek vykazovat značné geometrické nepřesnosti. Do rozměru obrobku se započítají také další chyby ovlivněné polohováním, chybami od tepelných dilatací, pracovního procesu, obrobkem atd. Proto je hlavním úkolem dosáhnout geometrické přesnosti co nejvyšší, a tím zpřesnit výrobu, ovšem v kompromisu s finančními náklady.

5. POUŽITÉ ZDROJE

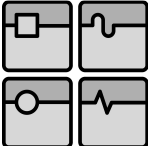
- [1] Svaz výrobců a dodavatelů strojírenské techniky Praha ČSN ISO 230-1, Praha: Český normalizační institut, 1998. 94 s.
- [2] DEMEČ, P. *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*, Košice: Vienaľa, 2001. 146 s. ISBN 80-7099-620-X
- [3] SVOBODA, O. *Prostorová přesnost frézovacích center při tepelně neustálených stavech*, Dizertační práce, Praha: ČVUT, 2007. 130 s.

World wide web

- [4] *Stabila* [online]. 2003 [cit. 2009-04-20].
Dostupný z WWW: <<http://www.stabila.cz/?cls=stoitem&stiid=4714>>
- [5] *Stabila* [online]. 2000 [cit. 2009-04-19].
Dostupný z WWW: <<http://www.stabila.cz/?cls=stoitem&stiid=4885>>
- [6] *Quantum maschinen* [online]. 2005 [cit. 2009-03-15].
Dostupný z WWW:
<<http://www.quantum-maschinen.de/produkte/messgeraete/wasserwaage/index.html>>
- [7] *Kinex* [online]. 2009 [cit. 2009-03-18].
Dostupný z WWW: <http://www.kinex.cz/document/katalog.pdf>
- [8] *Wylar* [online]. 2009 [cit. 2009-03-18].
Dostupný z WWW: <http://www.wylarag.com/frames_e/fre4_1.htm>
- [9] *Vermont Photonics* [online]. 2006 [cit. 2009-04-30].
Dostupný z WWW: <<http://www.vermontphotonics.com/visualautocoll.html>>
- [10] *Taylor Hobson* [online]. 2009 [cit. 2009-04-30].
Dostupný z WWW:
<<http://taylorhobsonmedia.sitedesign.net/uploads/images/autocollimators.pdf>>
- [11] *Uzimex* [online]. 2006 [cit. 2009-04-31].
Dostupný z WWW:
<<http://www.uzimex.cz/Sortiment/Mereni-primosti-laserem/Raytec-system-ag/Mereni-primosti/Merici-pristroj-GEPARD.html>>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 54
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [12] *Raytec* [online]. 2009 [cit. 2009-04-31].
Dostupný z WWW:
<<http://www.raytec.com/cms/website.php?id=/en/index/produkte/gepard.htm&sid=3767cb8d7e5d59b01c8db1ecc4b28dc6>>
- [13] *Mahr* [online]. 2009 [cit. 2009-04-24].
Dostupný z WWW:
<<http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.php?ContentID=703&NodeID=5458&FileID=6655&ContentDataID=20666&save=0>>
- [14] *Cromwell* [online]. 2008 [cit. 2009-04-30].
Dostupný z WWW:
<<http://www.cromwell.co.uk/static/publication/547/pages/573.pdf>>
- [15] *Limtek* [online]. 2001 [cit. 2009-04-30].
Dostupný z WWW: <http://www.limteklaser.com/ccd_rovno.htm>
- [16] *Raytec* [online]. 2009 [cit. 2009-04-30].
Dostupný z WWW:
<<http://www.raytec.com/cms/website.php?id=/de/index/produkte/pentaprisma.htm>>
- [17] *Hamer Laser* [online]. 2006 [cit. 2009-03-30].
Dostupný z WWW:
<http://www.hamarlaser.com/systems/L743/L740_Series_Brochure.pdf>
- [18] *Faro* [online]. 2009 [cit. 2009-04-15].
Dostupný z WWW:
<http://www.faro.com/01_Tracker_microsite/01_Home/LaserTracker_Home.htm>
- [19] *Api* [online]. 2006 [cit. 2009-04-15].
Dostupný z WWW: <http://www.apisensor.com/PDF/Tracker3_euDE.pdf>
- [20] *Leica Geosystems* [online]. 2009 [cit. 2009-04-28].
Dostupný z WWW:
<http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs_66262.htm>
- [21] *Uzimex* [online]. 2006 [cit. 2009-04-28].
Dostupný z WWW:
< <http://www.uzimex.cz/Vyrobcce/Agilent-technologies/Laserova-interferometrie/Laserovy-interferometr.html> >
- [22] *Agilent* [online]. 2009 [cit. 2009-04-28].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 55
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Dostupný z WWW:

<<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=536900395.536881094.00&c=US&lc=eng>>

- [23] *Lasertex* [online]. 2009 [cit. 2009-04-22].

Dostupný z WWW:

<<http://lasertex.eu/index.php?lang=en&page=products&id=0>>

- [24] *Lami Kappa* [online]. 2009 [cit. 2009-05-15].

Dostupný z WWW:

<<http://www.lamikappa.cz/php/attach/prospekt-levalign-ultra.pdf>>

- [25] *Remishaw* [online]. 2009 [cit. 2009-05-07].

Dostupný z WWW:

<<http://www.renishaw.com/en/6813.aspx>>

- [26] *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2009-05-20].

Dostupný z WWW:

<<http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacove-analyzy-fem-virtualni-testovani-prototypu>>

- [27] *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2009-05-20].

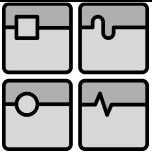
Dostupný z WWW:

<<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyzkum-strojirenske-vyrobni-techniky-a-technologie-1-cast>>

6. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Přímota čáry v rovině [1]	14
Obr. 2 Přímota čáry v prostoru [1]	15
Obr. 3 Měření délky [1]	15
Obr. 4 Měření ve svislé rovině [1]	16
Obr. 5 Měření ve vodorovné rovině [1]	16
Obr. 6 Křivky úchylek [1]	17
Obr. 7 Zaměřovací laser [1]	18
Obr. 8 Laser interferometr [1]	18
Obr. 9 Měření úhlů [1]	18
Obr. 10 Grafické zpracování [1]	19
Obr. 11 Měření vodováhou [1]	19
Obr. 12 Měření autokolimátorem [1]	20
Obr. 13 Měření laser interferometricky [1]	20
Obr. 14 Přímé měření úchylek [1]	21
Obr. 15 Měření úhlových úchylek [1]	21
Obr. 16 Použití odlehčeného prizmatu [1]	21
Obr. 17 Měření válcových ploch [1]	22
Obr. 18 Měření svislých ploch [1]	22
Obr. 19 Měření na šikmém loži [1]	23
Obr. 20 Měřicí trn [1]	24
Obr. 21 Měření dvou os [1]	25
Obr. 22 Můstek pro měření os [1]	25
Obr. 23 Osa s rovinou [1]	25
Obr. 24 Osa s dvěma rovinami [1]	26
Obr. 25 Průsečnice dvou rovin s třetí rovinou [1]	26
Obr. 26 Rovnoběžnost dvou přímek [1]	27
Obr. 27 Rovina je pohybující se částí [1]	27
Obr. 28 Rovina není pohybující se částí [1]	28
Obr. 29 Rovnoběžnost dráhy s osou [1]	28
Obr. 30 Rovnoběžnost dvou drah [1]	28
Obr. 31 Souosost [1]	29
Obr. 32 Měření kolmosti [1]	30
Obr. 33 Dvě roviny [1]	30
Obr. 34 Pevné osy [1]	30

Obr. 35 Osa otáčení [1]	31
Obr. 36 Pevná osa [1]	31
Obr. 37 Pevná osa s průsečnicí [1]	31
Obr. 38 Osa otáčení s průsečnicí [1]	32
Obr. 39 Kolmost dráha-rovina [1]	32
Obr. 40 Kolmost dráha-osa [1]	33
Obr. 41 Radiální házení [1]	33
Obr. 42 Vnější plochy [1]	34
Obr. 43 Vnitřní plochy [1]	34
Obr. 44 Čelní házení [1]	35
Obr. 45 Měření na lící desce [1]	35
Obr. 46 STABILA 196-EL [4]	36
Obr. 47 STABILA LMX [5]	36
Obr. 48 Vodováha QUANTUM [6]	37
Obr. 49 Vodováhy KINEX [7]	37
Obr. 50 Úhlová vodováha WYLER [8]	37
Obr. 51 Optický autokolimátor [9]	37
Obr. 52 Elektronický autokolimátor [10]	38
Obr. 53 Gepard [12]	38
Obr. 54 Číselníkový úchylkoměr [14]	38
Obr. 55 Digitální úchylkoměr [13]	38
Obr. 56 Měření CCD kamerou [15]	39
Obr. 57 Pentagonální hranol [16]	39
Obr. 58 Jemně nastavovací jednotka pentagonálního hranolu [16]	39
Obr. 59 Hamer laser [17]	40
Obr. 60 Měření pomocí Hamer laseru – rovinnost, kolmost, přímost [17]	40
Obr. 61 Laser tracker FARO [18]	40
Obr. 62 Laser tracker LEICA, API [20, 19]	41
Obr. 63 Laserová hlava AGILENT 5517 [22]	42
Obr. 64 Interferometr AGILENT 10735A [22]	42
Obr. 65 Interferometr LASERTEX [23]	42
Obr. 66 Složení systému 5530 [24]	43
Obr. 67 Technická data LEVELIGN laseru [23]	43
Obr. 68 Ballbar [25]	44
Obr. 69 Příklad vykreslení [25]	44

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 58
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Obr. 70 Zjednodušený model univerzální frézky	45
Obr. 71 Souřadné systémy modelových těles.....	47
Obr. 72 Chyby v ose x [3]	49
Obr. 72 Analýza metodou konečných prvků [27]	51